

Contribuição para a melhoria da manutenção de Máquina Fragmentadora

Ana Sofia Teixeira Cardoso

Dissertação do MIEM

Orientador: Professor Doutor Francisco Jorge Teixeira de Freitas



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Opção de Automação

Ano Letivo 2013/ 2014

À minha mãe

Resumo

O tratamento de resíduos sólidos industriais é uma atividade económica em crescimento, e dedica-se a fazer o maior reaproveitamento possível de componentes metálicos e não metálicos, nomeadamente os veículos automóveis em fim de vida. Uma das importantes etapas desta indústria é o processo de fragmentação dos componentes metálicos, que depende essencialmente da existência de máquinas fragmentadoras. Estas máquinas são altamente produtivas e delas depende a rentabilidade económica das empresas. No entanto, estas máquinas requerem paragens periódicas para manutenção que, devido à sua grande morosidade, podem comprometer a atividade da empresa e o seu sucesso económico.

Assim, surgiu a necessidade de desenvolver um estudo de uma solução para melhorar o processo de manutenção e aumentar a sua eficiência e produtividade levando assim a um maior aproveitamento económico das máquinas fragmentadoras.

Numa primeira fase foi necessário fazer uma análise das soluções existentes e um estudo mais aprofundado das máquinas fragmentadoras alvo de estudo neste trabalho. De seguida começou-se por desenvolver a solução de projeto mecânico para o novo sistema de apoio à manutenção com base nos requisitos impostos, e por fim propor a sua solução de automação.

No final desta dissertação concluiu-se que a nova solução desenvolvida para o processo de manutenção consegue cumprir os requisitos especificados e ainda acrescentar certas características significativas para todo o processo que resultam num processo com menor complexidade, maior segurança e menor duração, e numa máquina fragmentadora com maior produtividade, eficiência e tempo de vida útil.

Contribution for the improvement in maintenance of a shredder machine

Abstract

Industrial solid waste treatment is an economic activity in growth and aims at making the highest possible reuse of metallic and non-metallic components, particularly end-of-life motor vehicles. One of the most important stages of this industry is the fragmentation process of the metallic components, which essentially depends on the existence of a shredder machine. These machines are highly productive and the economic profitability of the companies rely on their proper continuous functioning. However, these machines require periodic maintenance shutdowns that due to their long duration can reduce the company's activity and their economic success.

In that way, it emerged the need to develop a study of a novel solution to improve the maintenance process and increase its efficiency and productivity, thus leading to greater economic use of shredder machines.

Initially it was necessary to make an analysis of existing solutions and a detailed study of shredder machines. Then it was undertaken the development of the mechanical design of a novel solution for the new maintenance procedure based on the defined requirements and finally it was proposed its automation solution.

At the end of this study it was concluded that the new solution for the maintenance process can meet the specified requirements and adds some significant features for the whole process which results in a less complex and shorter process and in a more productive, efficient and with longer lifetime shredder.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Professor Francisco Jorge Teixeira de Freitas, em primeiro lugar pela sua preocupação em encontrar um tema de dissertação que correspondesse às minhas expectativas, e, em segundo lugar, por toda a sua orientação e exigência sempre presente ao longo de toda a dissertação.

À Professora Sara Fernandes pela sua pronta disponibilidade, ajuda e incentivo na realização deste trabalho.

Ao Professor Marco Parente pela sua paciência e ajuda que foram fundamentais para uma rápida aprendizagem.

Ao Sr. Joaquim Silva, técnico de laboratório, pela sua sempre vontade de ajudar e ensinar e, não menos importante, pela sua amizade e boa disposição presentes todos os dias no laboratório.

Aos meus pais e ao meu irmão por fazerem tudo o que estava ao seu alcance para conseguir alcançar os meus sonhos, partilhados por eles também, e em especial à minha mãe por nunca me deixar desacreditar no meu valor e nas minhas capacidades e me sempre incutir o espírito de que tudo é possível.

Ao Pedro pelo seu constante apoio, carinho e paciência, por me fazer ver, nos momentos mais difíceis, o lado positivo e descomplicado das coisas e por ter sido um dos grandes pontos de força.

Por fim a todos os meus amigos e às grandes amizades que levo da faculdade que fizeram com que estes fossem os melhores 5 anos da minha vida académica, e a quem também dedico esta dissertação. Agradeço em especial ao João Malheiro e ao Francisco Penteado por todo o apoio, paciência, alegria constante e grande suporte durante este longo e difícil ano, fundamentais para a concretização esta etapa.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
1. Introdução	1
1.1 Apresentação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização e temas abordados do relatório	3
2. Máquinas fragmentadoras	5
2.1 Classificação das máquinas fragmentadoras.....	5
2.2 Tipos de soluções construtivas	7
2.2.1 Rotor vertical	7
2.2.1.1 Tipos de configurações de rotor	8
2.2.2 Rotor horizontal.....	9
2.2.2.1 Tipos de configuração de rotor.....	10
2.3 Máquinas fragmentadoras em estudo	13
2.3.1 Constituição	13
2.3.2 Princípio de funcionamento	16
2.3.3 Principais características	18
2.3.4 Manutenção do equipamento	19
3. Conceção de uma solução alternativa para o processo de manutenção.....	23
3.1 Requisitos.....	23
3.2 Definição dos movimentos a integrar na solução	24
3.2.1 Movimentação do rotor.....	25
3.2.2 Procedimento de Manutenção	31
3.2.2.1 Nova conceção de rotor.....	31
3.2.2.2 Operações de manutenção.....	33
3.3 Análise da solução proposta	37
3.4 Desenvolvimento do sistema.....	39
3.4.1 Elevador hidráulico: estrutura e componentes	39

3.4.1.1	Estrutura	39
3.4.1.2	Cilindros hidráulicos	45
3.4.1.3	Cabos de elevação	46
3.4.1.4	Guiamentos	46
3.4.2	Extremidades do rotor	49
3.4.3	Sistema guincho e cabos	52
3.4.4	Cilindros hidráulicos da operação de manutenção	56
3.5	Análise estrutural	57
3.5.1	Análise à estrutura principal do elevador sem carga	57
3.5.1.1	Propriedades mecânicas	58
3.5.1.2	Condições de fronteira e cargas aplicadas	58
3.5.1.1	Resultados e análise	59
3.5.2	Análise à estrutura principal do elevador com carga	61
3.5.2.1	Propriedades mecânicas	61
3.5.2.2	Condições de fronteira e cargas aplicadas	61
3.5.2.3	Resultados e análise	63
3.5.3	Análise à mesa do elevador	66
3.5.3.1	Propriedades mecânicas	66
3.5.3.2	Condições fronteira e cargas aplicadas	66
3.5.3.3	Resultados e análise	67
4.	Acionamentos e comando do sistema	69
4.1	Circuitos hidráulicos	70
4.1.1	Elevador	70
4.1.2	Movimento de encaixe no guiamento	71
4.1.3	Movimento de auxílio à articulação	73
4.2	Acionamentos	76
4.3	Elementos de Comando e Sensorização	82
4.3.1	Elemento de comando e controlo do servomotor	82
4.3.2	Detetores de fim de curso	82
4.3.3	Transdutor de pressão	82
4.3.4	Transdutores de deslocamento	83
4.3.5	Codificador	83

4.4	Segurança.....	84
4.5	GRAFCET.....	85
4.6	Autómato programável.....	87
5.	Conclusões	89
5.1	Trabalhos futuros.....	90
6.	Bibliografia	91
ANEXO A:	Listagem dos componentes hidráulicos	93
ANEXO B:	Motores elétricos	97
ANEXO C:	Listagem de variáveis	99
ANEXO D:	Autómato Twido	103
ANEXO E:	GRAFCET'S de programação	105

Índice de Figuras

Figura 1. Vista geral de uma máquina fragmentadora (US shredder and casting group).	6
Figura 2. Máquinas Fragmentadoras com diferentes orientações do rotor. (H. R. Manouchehri, 2007)	7
Figura 3. Máquina fragmentadora de rotor vertical (HENSCHHEL)	8
Figura 4. Rotor vertical. (HENSCHHEL)	9
Figura 5. Máquina fragmentadora de rotor horizontal (US shredder and casting group, 2014)	9
Figura 6. Bigorna (US shredder and casting group, 2014)	9
Figura 7 Rotor totalmente fechado. (Shredder Focus: A Guide to Rotors, 2002)	11
Figura 8. Rotor de discos “soldado” (Shredder Focus: A Guide to Rotors, 2002)	11
Figura 9 Rotor de discos “não soldado” (Shredder Focus: A Guide to Rotors, 2002)	11
Figura 10 Rotor Spider(Shredder Focus: A Guide to Rotors, 2002)	12
Figura 11. Rolo de doseamento e prensagem.	13
Figura 12. Rotor horizontal de martelos	14
Figura 13. Martelos	14
Figura 14. Carcaça do rotor	14
Figura 15. Grelhas de saída dos fragmentados	14
Figura 16. Absorção de vibrações	15
Figura 17. Cabine de controlo	15
Figura 18 Esquema representativo de uma máquina fragmentadora com rotor horizontal de martelos (Alton S. Newell, 1985)	15
Figura 19. Máquina fragmentadora de rotor horizontal com martelos. (Shredder Plant, 2014)	16
Figura 20. Sistema hidráulico de remoção dos veios para manutenção do rotor (Shredder Plant, 2014)	20
Figura 21. Operador durante processo de manutenção.	21
Figura 22 Vista geral da solução	24
Figura 23. Vista geral da solução com dimensões globais.	25
Figura 24. Rotor durante o movimento ascendente.	26
Figura 25. Vista em pormenor do rotor na posição final após o movimento ascendente.	26
Figura 26. Posição final do rotor após o movimento angular.	26
Figura 27. Vista global durante movimento combinado.	27
Figura 28. Rotor na posição vertical após o movimento combinado.	27
Figura 29. Vista em detalhe dos cilindros hidráulicos na parte final do movimento.	28
Figura 30. Vista em detalhe do batente no elevador.	28
Figura 31. Rotor na posição de manutenção.	28
Figura 32. Vista de detalhe do rotor colocado no guiamento.	28
Figura 33. Movimento angular	29
Figura 34. Vista em detalhe dos cilindros hidráulicos de articulação da mesa.	29
Figura 35. Rotor durante o movimento combinado.	29
Figura 36. Movimento descendente.	30
Figura 37. Nova conceção de rotor.	32
Figura 38. Vista em corte ao centro do rotor	32
Figura 39. Vista em corte do rotor na sua posição de manutenção.	33
Figura 40. Macaco hidráulico (cor de laranja) colocado no interior do rotor.	34
Figura 41. Posição final dos macacos, após movimento ascendente.	34
Figura 42. Movimento descendente.	35
Figura 43. Vista geral da solução com as plataformas.	35
Figura 44. Esquema representativo das forças exercidas pelo cilindro hidráulico.	36
Figura 45. Rotor na sua posição mais inferior e respetivos batentes.	36
Figura 46. Esquema das forças e deslocamentos presentes num elevador hidráulico telescópico	39

Figura 47. Elevador hidráulico e dimensões globais	40
Figura 48. Vista em detalhe da coluna com os dois perfis H.	41
Figura 49. Vista em detalhe da coluna com o reforço da placa e os orifícios para soldadura.	41
Figura 50. Vista em detalhe da soldadura entre os dois perfis	41
Figura 51. Estrutura do elevador.	42
Figura 52. Esquema representativo das forças presentes na estrutura	43
Figura 53. Estrutura do elevador e os tirantes.	43
Figura 54. Estrutura com as duas plataformas.	44
Figura 55. Gradis.	44
Figura 56. Cilindros hidráulicos.	45
Figura 57. Corrediça inferior do elevador.	47
Figura 58. Vista em detalhe da orientação das rodas.	47
Figura 59. Corrediças inferiores do elevador.	47
Figura 60. Corrediça superior.	47
Figura 61. Corrediças superiores.	47
Figura 62. Corrediça superior e inferior com ligação rígida.	48
Figura 63. Rotor na posição de funcionamento	49
Figura 64. Rotor com as peças das extremidades colocadas	49
Figura 65. Mesa do elevador	50
Figura 66. Movimento horizontal de recuo do tubo de acoplamento do rotor.	50
Figura 67. Esquema representativo das forças presentes quando o rotor se encontra a 80°.	51
Figura 68. Travessão de apoio superior do rotor.	52
Figura 69. Guincho	52
Figura 70. Esquema representativo das forças aplicadas.	53
Figura 71. Tambores.	54
Figura 72. Parte da estrutura do elevador submetido a análise.	57
Figura 73. Representação do encastramento na estrutura.	58
Figura 74. Representação da carga aplicada do tirante.	59
Figura 75. Distribuição das tensões na estrutura.	59
Figura 76. Representação dos deslocamentos obtidos na estrutura.	60
Figura 77. Representação do encastramento na estrutura.	61
Figura 78. Representação da carga horizontal aplicada.	62
Figura 79. Representação da carga aplicada do tirante.	62
Figura 80. Representação do esforço provocado pelos cabos.	63
Figura 81. Representação do esforço provocado pelos cilindros hidráulicos.	63
Figura 82. Distribuição das tensões na estrutura.	64
Figura 83. Representação dos deslocamentos obtidos na estrutura.	64
Figura 84. Vista em pormenor dos pontos que sofreram maior deslocamento.	65
Figura 85. Peça inferior do rotor e o veio que faz a ligação com o elevador.	66
Figura 86. Representação do encastramento no veio.	66
Figura 87. Representação das cargas aplicadas no veio.	67
Figura 88. Distribuição das tensões no veio	67
Figura 89. Deslocamentos obtidos no veio.	68
Figura 90. Circuito hidráulico do elevador.	70
Figura 91. Circuito hidráulico do movimento de encaixe no guiamento.	72
Figura 92. Circuito hidráulico dos cilindros de auxílio ao movimento de rotação	74
Figura 93. Esquema representativo das relações presentes entre sistemas.	76
Figura 94. Esquema representativo das forças presentes quando o rotor se encontra na horizontal.	80
Figura 95. Gradeamento na plataforma.	84
Figura 96. Comando de funcionamento.	85

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1. Resumo das principais características de cada configuração de rotor.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 2. Parâmetros de seleção dos cilindros de hidráulicos de elevação.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 3. Parâmetros de seleção dos cabos de aço</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 4. Parâmetros de seleção dos cilindros de hidráulicos da mesa do rotor.</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 5. Parâmetros de seleção dos cilindros de hidráulicos de auxílio à articulação.</i>	<i>51</i>
<i>Tabela 6. Parâmetros de seleção dos cabos de aço</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 7. Parâmetros de seleção do diâmetro do tambor.</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 8. Parâmetros de seleção do comprimento do tambor.</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 9. Parâmetros de seleção do veio do tambor.</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 10. Parâmetros de seleção dos cilindros de manutenção.</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 11. Propriedades mecânicas do material dos elementos. (Granta Design Limited, 2012)</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 12. Velocidades do tambor e elevador em cada movimento.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 13. Parâmetros de seleção do motor e bomba para o elevador.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 14. Parâmetros de seleção da bomba e motor para o movimento de encaixe no guiamento.</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 15. Parâmetros de seleção da bomba e motor para o movimento de auxílio à articulação.</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 16. Parâmetros de seleção do servomotor para o sistema tambor.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 17. Resumo dos elementos de sensorização utilizados.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 18. Varáveis do sistema</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 19. Módulos selecionados para o autômato.</i>	<i>87</i>

1. Introdução

1.1 Apresentação

O aparecimento do conceito de desenvolvimento sustentável trouxe consigo a criação de novas indústrias, tal como a indústria de tratamento de resíduos sólidos industriais. Esta indústria dedica-se a fazer o maior reaproveitamento possível de componentes metálicos e não metálicos, nomeadamente os veículos automóveis em fim de vida.

Segundo o INE (Instituto Nacional de Estatística) o sector “desperdícios e sucata” no ano de 2012 teve um volume de negócios de 762 M€ que, comparativamente ao ano de 2009, representou uma duplicação da faturação. Estes números demonstram o crescimento desta indústria nos últimos anos, bem como a sua importância, nomeadamente atendendo ao clima de recessão em que se vive. (Instituto Nacional de Estatística, 2013) (Instituto Nacional de Estatística, Estatísticas do Comércio 2009, 2010)

Para tal crescimento ser possível existe a necessidade de desenvolver meios adequados ao processamento dos componentes, nomeadamente metálicos, já no fim do seu ciclo de vida até chegar à transformação destes em novos componentes metálicos com valor económico suficiente para corresponder à sustentabilidade desejada.

Inicialmente há uma fase de desmantelamento dos equipamentos, como as viaturas automóveis ou grandes eletrodomésticos, onde são retirados todos os constituintes não metálicos. Posteriormente existe um processo de fragmentação de forma a reduzir a dimensão destes componentes, que muitas vezes apresentam um grande volume, e a subsequente separação nos diferentes tipos de metais.

Os materiais de maior valor acrescentado, tais como ouro, cobre, alumínio, chumbo, zinco são separados, restando os materiais derivados do ferro, em muito maior quantidade, que sendo isentos dos outros materiais metálicos têm por si só um maior valor de

reutilização. Na indústria siderúrgica realiza-se a sua transformação em novos componentes metálicos ferrosos, mas isentos de contaminantes.

Este processo de fragmentação, e subsequente separação dos materiais, depende essencialmente da existência de “máquinas fragmentadoras” que são em geral máquinas de grande dimensão e que constituem um investimento muito grande mas fundamental para a atividade neste ramo do tecido económico.

São, em geral, máquinas de muito grande capacidade de transformação de materiais e que, portanto, arrastam por si outros requisitos quer a montante quer a jusante do seu funcionamento, fazendo com que do seu estado, ou não, de funcionamento dependa toda a atividade de uma empresa.

Assim sendo, a fiabilidade, as necessidades e requisitos associados à boa manutenção destas máquinas são determinantes no sucesso económico das empresas que as detêm. Uma máquina destas, quando em funcionamento, pode ser um contributo inestimável para o sucesso económico de uma empresa, mas quando inoperacional é uma razão indiscutível para o seu insucesso.

Sendo máquinas cujo princípio de funcionamento incide na fragmentação por impacto ultra violento de ferramentas sobre um material a fragmentar, este tema é assim da maior importância para o sucesso de uma empresa do setor.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem por objetivo a conceção de uma solução para apoio ao processo de manutenção periódica de uma máquina fragmentadora que consiga tornar mais eficiente essa operação, reduzindo o mais possível o tempo de paragem da máquina de modo a aumentar a sua produtividade e eficiência.

Esta dissertação tem como objetivo específico o desenvolvimento de uma solução mecânica, estrutural, e de automação, para a melhoria da manutenção de uma máquina fragmentadora.

1.3 Organização e temas abordados do relatório

Este trabalho desenvolve-se fundamentalmente ao longo de três capítulos principais:

- no capítulo 2 é feita uma abordagem às máquinas fragmentadoras, soluções construtivas e tipos funcionais e uma análise do tema da manutenção
- no capítulo 3 é proposta nova solução para melhoria da manutenção e a sua solução mecânica,
- no capítulo 4 é por fim apresentado o desenvolvimento da solução de automação que suporta o funcionamento da solução proposta.

A abordagem de uma forma geral às máquinas fragmentadoras teve como intuito ter uma melhor compreensão destas máquinas, nomeadamente no que diz respeito às soluções construtivas existentes, ao seu princípio de funcionamento, às suas características principais e ao seu campo de aplicação. Também foi abordada, já com mais detalhe, a máquina de fragmentação alvo deste trabalho, com uma explicação da sua constituição, dos seus pontos fortes e fracos e uma descrição do seu processo de manutenção com os problemas que daí resultam.

Na conceção da solução e seu desenvolvimento mecânico foi indispensável delinear quais os requisitos necessários e limitadores para a nova solução, de forma a conseguir traçar um caminho de orientação. Após os elementos principais e os movimentos estarem definidos começou-se por definir cada elemento constituinte da solução e por fim a análise dimensional da estrutura global.

No desenvolvimento da solução de automação do sistema, começou-se por dimensionar e escolher os elementos de acionamento de cada movimento. De seguida definiu-se quais os elementos de controlo e comando necessários ao sistema e abordou-se, de uma forma global, o tema da segurança, fazendo uma análise ao sistema e indicando elementos necessários. Por fim, foram desenvolvidos GRAFCET's de forma a determinar o processo sequencial dos movimentos do sistema e também tendo em vista uma posterior programação, que não foi implementada neste projeto.

Como conclusão desta dissertação são apresentadas as conclusões e análises comparativas entre a nova solução e a atual solução do processo de fragmentação, e ainda apontados trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir desta dissertação com o objetivo da implementação da solução.

2. Máquinas fragmentadoras

No processo de redução da dimensão dos componentes metálicos são utilizadas máquinas fragmentadoras, também designadas por máquinas trituradoras que, através de ações sucessivas de impacto, transformam matérias contínuas em partículas finas. Estas partículas finas são posteriormente separadas de acordo com o tipo de material para, de seguida, serem transformadas em novos produtos.

Neste capítulo é feita uma abordagem geral às máquinas fragmentadoras apresentando a sua classificação, segundo a dimensão e aplicação, seguido das soluções construtivas mais comuns neste setor, revelando as principais características e aplicações.

Por fim é feita uma apresentação em detalhe do tipo de máquina fragmentadora que é objeto de estudo neste trabalho, especificando a sua constituição, o seu princípio de funcionamento, as suas principais características e a identificação do maior problema deste tipo de máquinas.

2.1 Classificação das máquinas fragmentadoras

A necessidade de capacidades de produção diferentes por parte da indústria e de materiais a serem processados distintos levou à construção de máquinas que respondessem a essas necessidades, conduzindo assim à sua divisão em quatro grupos. As máquinas fragmentadoras podem ser então classificadas segundo a sua dimensão em:

- Pequenas;
 - Médias;
 - Grandes;
 - Muito grandes.
- (H. R. Manouchehri, 2007)



Figura 1. Vista geral de uma máquina fragmentadora (US shredder and casting group).

As máquinas de pequena dimensão são geralmente compostas por dois rotores de orientação horizontal, com sentidos de rotação opostos. A potência destas máquinas varia entre 40 e 200 kW e a sua capacidade de produção entre 1,5 e 10 tons/h. Em geral, estas máquinas destinam-se à fragmentação de componentes mais pequenos como pequenos eletrodomésticos, resíduos médicos metálicos, caixotes do lixo, resíduos de oficinas, etc. (UNTHA, 2014)

As máquinas de tamanho médio têm apenas um rotor que pode ter orientação horizontal ou vertical e que, vulgarmente, possui martelos nas extremidades com livre rotação que se encontram ligados através de um veio. Contudo, algumas destas máquinas fragmentadoras têm estrelas de fragmentação em vez de martelos. A gama de potência destas máquinas varia entre 350 e 750 kW e com capacidade de produção de 10 até 20 tons/h. A sua aplicabilidade incide, sobretudo, na trituração de equipamentos elétricos, resíduos eletrónicos, componentes em alumínio, tambores de metal, etc. (UNTHA, 2014)

As máquinas de grande porte têm potências que podem variar entre 750 kW e 2,5 MW podendo mesmo chegar a 3MW e com uma capacidade de produção de 20 a 125 tons/h. Em geral, destinam-se à fragmentação de carrocerias de veículos automóveis, blocos de motores e *light scrap*. (Hammel, 2014)

As máquinas de muito grande dimensão são as que detêm as potências maiores, desde 3MW até 5,5 MW, bem como a capacidade de produção, que pode ir de 100 até 250 tons/h. Estas máquinas fragmentadoras trituram qualquer resíduo metálico qualquer seja a sua dimensão ou forma. (H. R. Manouchehri, 2007) (Metso, 2014)

Atualmente, as máquinas fragmentadoras atingem grandes dimensões físicas e podem ter diferentes soluções construtivas em relação a algumas das suas principais características, tais como o número e orientação (vertical ou horizontal) dos rotores, a sua constituição e configuração (com martelos ou estrelas de trituração), ou até mesmo o sistema de alimentação.

2.2 Tipos de soluções construtivas

Nos dias de hoje, as máquinas fragmentadoras, dependendo da sua configuração, podem ter o rotor na posição horizontal ou vertical, tal como mostra a Figura 2 com máquinas fragmentadoras de diferentes construtores.

As máquinas fragmentadoras de rotor vertical têm como aplicação a fragmentação de materiais eletrónicos (computadores, impressoras, eletrodomésticos, resíduos industriais, etc), enquanto as máquinas de rotor horizontal são mais aconselhadas para a fragmentação de “light scrap”, chapas finas, como é o caso dos automóveis, e de resíduos mistos. (H. R. Manouchehri, 2007) (Kubota, 2014)

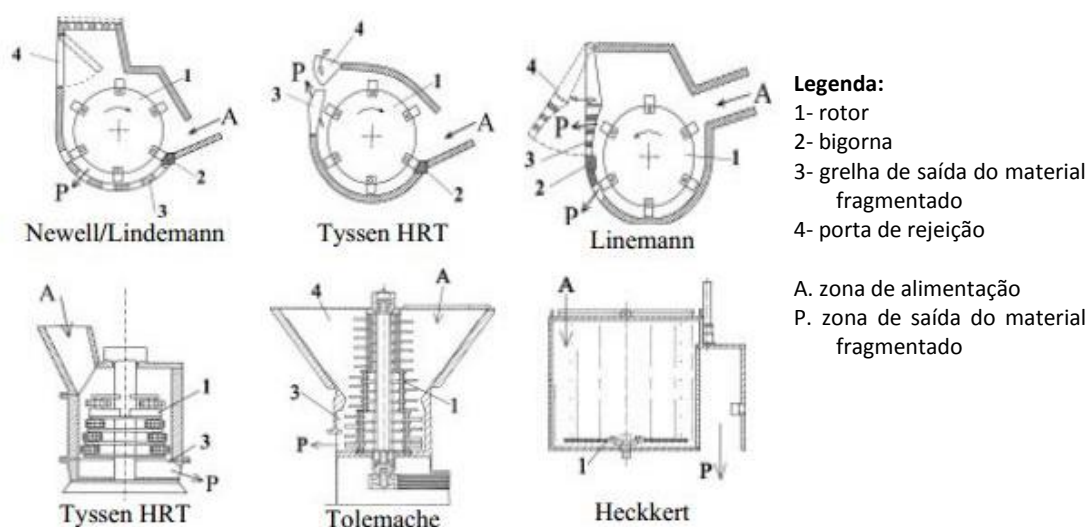


Figura 2. Máquinas Fragmentadoras com diferentes orientações do rotor. (H. R. Manouchehri, 2007)

2.2.1 Rotor vertical

As máquinas fragmentadoras de rotor vertical, de uma forma geral, têm o rotor localizado na sua parte central e o sistema de alimentação de material na parte superior. (Figura 3) Esta disposição, aliada à força gravítica e com a presença de elementos no rotor que permitem a fragmentação do material, origina um fluxo direcional do extremo superior até ao extremo inferior da máquina. A fragmentação dá-se ao longo do mesmo, entre as paredes da máquina e os elementos de fragmentação, com uma redução em contínuo do tamanho das partículas. Este princípio de funcionamento permite um tamanho final das partículas bastante uniforme e de forma globular eliminando praticamente a necessidade de grelhas de calibragem.

Uma das principais características destas máquinas fragmentadoras é a necessidade de menor energia para a fragmentação comparativamente com as máquinas de rotor

horizontal. Tal característica deve-se ao *design* muito mais estreito na parte do alojamento do rotor que resulta numa menor dispersão do material dentro da máquina.

As máquinas fragmentadoras de rotor vertical têm como aplicações a fragmentação de resíduos metálicos previamente triturados de forma grosseira e de *light scrap*. (H. R. Manouchehri, 2007) (HENSCHEL)



Figura 3. Máquina fragmentadora de rotor vertical (HENSCHEL)

2.2.1.1 Tipos de configurações de rotor

De uma forma geral as máquinas fragmentadoras de rotor vertical são constituídas por níveis, onde em cada nível existe um número de veios equidistantes entre si que albergam estrelas de trituração, tal como se pode ver na Figura 4. Este tipo de rotor, através da sua rotação, aplica continuamente forças de corte, compressão, atrito e impacto no material que se pretende fragmentar o que resulta em resíduos fragmentados de tamanho uniforme. (HENSCHEL) (FERCELL, 2014)



Figura 4. Rotor vertical. (HENSCHTEL)

2.2.2 Rotor horizontal

Nas máquinas fragmentadoras de rotor horizontal, de uma forma geral, o rotor encontra-se na parte mais inferior e o sistema de alimentação numa posição mais superior, como se pode ver na Figura 5. O princípio de funcionamento baseia-se, em oposição às máquinas fragmentadoras de rotor vertical, numa redução brusca do tamanho dos resíduos através de impactos sucessivos no material causados por elevadas velocidades de rotação do rotor e pela força inercial centrífuga presente nos elementos de fragmentação. Estes impactos dão-se entre os elementos de fragmentação e um outro elemento importante da máquina, a bigorna. A bigorna localiza-se na saída da rampa de alimentação de material, perto do rotor, como se pode ver na Figura 6, e serve de batente no momento do impacto.



Figura 5. Máquina fragmentadora de rotor horizontal (US shredder and casting group, 2014)

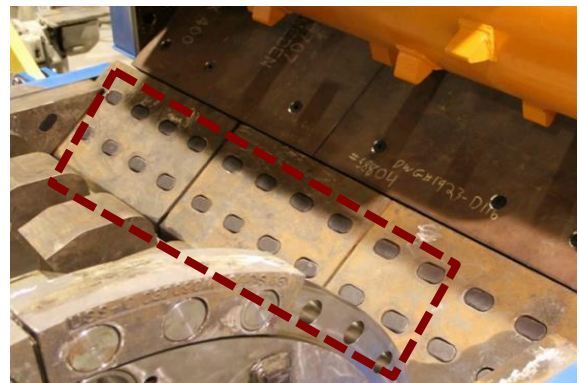


Figura 6. Bigorna (US shredder and casting group, 2014)

A configuração deste tipo de máquinas fragmentadoras diferencia-se da configuração com rotor vertical não só pela orientação deste, mas também por certas características, tais como:

- Menor tempo de permanência do material dentro da máquina, em consequência da presença de tensões mais fortes no processo de fragmentação, o que reduz rapidamente a dimensão do material a fragmentos;
- Folgas mínimas entre as ferramentas de impacto (martelos) e a parte inferior do alojamento do rotor;
- Grande espaço vazio na parte superior do alojamento do rotor;
- Maior velocidade periférica que resulta numa redução drástica no tamanho e massa dos fragmentos.

2.2.2.1 Tipos de configuração de rotor

As máquinas fragmentadoras de rotor horizontal diferenciam-se umas das outras, sobretudo pela configuração de rotor que apresentam. Estes podem ser de maior ou menor dimensão, com elementos de fragmentação possíveis, ou não, de ser removíveis, mais indicados para um tipo de material e com pontos fortes e fracos. Apresentam-se de seguida os vários tipos de rotores mais comuns e as suas características.

- **Rotor totalmente fechado**

Este tipo de rotor é composto por martelos livres em rotação e “capas protetoras” que permitem que os discos do rotor não sejam expostos no processo de fragmentação e que são substituíveis resultando assim numa maior vida útil do rotor. (Figura 7) Esta configuração do rotor é mais indicada para *light scrap*, chapas finas, como é o caso das carroçarias dos automóveis.

Uma das suas grandes características que o diferencia de todas as outras configurações de rotores é sua grande inércia, criada pela concentração da massa na periferia, o que resulta em elevados momentos de inércia, vantajosos para o processo.

Como desvantagens destacam-se o processo de manutenção moroso (substituição dos martelos, “capas protetoras” e seus veios de alojamento) e a impossibilidade de poder ser usado em todos os modelos de máquinas fragmentadoras, devido à localização da bigorna, uma vez que os martelos não podem colidir com a bigorna quando se encontram na sua posição máxima. (Shredder Focus: A Guide to Rotors, 2002) (WENDT, 2012)



Figura 7 Rotor totalmente fechado.(Shredder Focus: A Guide to Rotors, 2002)

- **Rotor de discos**

O rotor de discos pode ser de dois tipos: com discos “soldados” (Figura 8) ou “não soldados” (Figura 9). Em ambos, a sua constituição resume-se a discos com o diâmetro do rotor e martelos entre cada um deles. Estes discos feitos a partir de material altamente resistente não podem ser removíveis resultando assim numa manutenção mínima, uma vez que não é possível substituir os discos. Esta configuração de rotor é ideal para fragmentação de resíduos mistos, ou seja, variedade de materiais.

Como grandes vantagens é de sublinhar a capacidade de ser mais resistente à rutura. Contudo, tem como inconvenientes a impossibilidade de poder ser usado em todos os modelos de trituradoras devido à localização da bigorna, tal como no rotor anterior, e a existência de grande desgaste dos discos, uma vez que não podem ser substituídos, levando à redução do tempo de vida útil.(Shredder Focus: A Guide to Rotors, 2002) (WENDT, 2012)



Figura 8. Rotor de discos “soldado” (Shredder Focus: A Guide to Rotors, 2002)



Figura 9 Rotor de discos “não soldado” (Shredder Focus: A Guide to Rotors, 2002)

- **Rotor *Spider***

Esta configuração de rotor possui um *design* em forma de “aranha”, como o nome indica, constituído por quatro filas de uma espécie de discos desfasados que possuem umas “capas de proteção” contra o desgaste. Cada disco possui duas possibilidades de posições

para os martelos de forma a aumentar a expectativa de vida quer dos martelos quer das grelhas inferiores da máquina de fragmentação. Figura 10

O *design* caraterístico que possui confere-lhe grande robustez e grandes propriedades como a boa capacidade de auto trituração, a alta expectativa de vida e a elevada taxa de produção, quando o material a fragmentar se trata de *light scrap*. Como inconvenientes apresenta o facto de ter um baixo momento de inércia e de se propiciar mais facilmente a ocorrência de atolamento. Dependendo do tamanho do rotor, o número de martelos necessários varia num intervalo de 12 a 34 martelos. (Shredder Focus: A Guide to Rotors, 2002) (WENDT, 2012) (Hammer mills, 2014)



Figura 10 Rotor Spider(Shredder Focus: A Guide to Rotors, 2002)

Apresenta-se de seguida uma tabela resumo das várias configurações de rotor com os seus pontos fortes e fracos e a sua melhor aplicação em termos de materiais.

Tabela 1. Resumo das principais caraterísticas de cada configuração de rotor.

	<i>Tipos de configuração de rotor</i>		
	<i>Rotor totalmente fechado</i>	<i>Rotor de discos</i>	<i>Rotor Spider</i>
<i>Tipo de material mais indicado</i> <i>Light scrap</i>	✓	✗	✓
<i>Resíduos mistos</i>	✗	✓	✗
<i>Caraterística mais vantajosa</i>	Elevada inércia	Elevada resistência à rutura	Grande vida útil
<i>Caraterística menos vantajosa</i>	Manutenção morosa	Elevado desgaste	Baixa inércia

2.3 Máquinas fragmentadoras em estudo

As máquinas fragmentadoras alvo de estudo neste trabalho são máquinas de rotor horizontal em que a configuração do rotor é totalmente fechada. Estas máquinas fragmentadoras têm como principais materiais alvo as carroçarias de veículos em fim de vida, o tipo de resíduos a que se chama *light scrap*. A sua constituição e princípio de funcionamento são idênticos à maioria das máquinas fragmentadoras que possuem um rotor de eixo horizontal.

2.3.1 Constituição

A máquina fragmentadora é composta, de uma forma geral, por 7 partes principais:

1. **Mecanismo alimentador ou rampa inclinável de alimentação:** o material a fragmentar é levado por um mecanismo tipo tapete rolante sendo depois lançado por gravidade para o rolo de prensagem;
2. **Sistema de prensagem/doseamento:** constituído por rolo com capacidade de prensagem e motorizado a velocidade de rotação controlada. Com estas propriedades este sistema permite reduzir por prensagem o volume dos componentes metálicos, aumentando a sua resistência à abrasão ou corte e, simultaneamente, fazer o doseamento alimentando assim de uma forma controlada a fragmentadora;



Figura 11. Rolo de doseamento e prensagem.

3. **Rotor:** encontra-se na posição horizontal e é animado de uma velocidade de rotação tal que os martelos de impacto são dotados de uma velocidade linear periférica elevada (várias centenas de quilómetros por hora). Os martelos, animados de grande energia cinética e força centrípeta, com massas de 50 a 80kg, dependendo da dimensão da máquina, articulam em veios inseridos no rotor com total liberdade de rotação. Estes veios, que percorrem o rotor de um extremo ao outro, permitem também a fixação de placas protetoras que dotam o

rotor de uma configuração global cilíndrica, constituindo unidades com uma massa total do rotor entre 20 e 30 tons;



Figura 12. Rotor horizontal de martelos



Figura 13. Martelos

4. **Carcaça:** a carcaça é construída em chapa de aço de grande espessura e contém na parte interior uma bigorna, as grelhas para a saída dos resíduos triturados, uma porta de rejeição para as peças que não conseguiram ser fragmentadas pelo rotor, e é ainda revestida interiormente por placas de desgaste, que evitam o desgaste da carcaça resultante do impacto dos fragmentos no seu interior. Para a realização da manutenção e possibilidade de acesso ao rotor é necessário que a carcaça seja composta por partes que articulam com grande amplitude.



Figura 14. Carcaça do rotor



Figura 15. Grelhas de saída dos fragmentados

6. **Unidade de despoeiramento:** realiza a aspiração das poeiras criadas pela fragmentação do material metálico bem como os fumos libertados durante a fragmentação. Geralmente encontra-se na parte superior;
7. **Tapetes de escoamento com tela vibratória:** tapete que, normalmente, se encontra na parte inferior da máquina de forma a recolher os fragmentos que, de seguida, são encaminhados para a etapa seguinte, a triagem. Este tapete incorpora uma tela vibratória para acelerar o arrefecimento dos fragmentos uma vez que estes saem a temperaturas altas, evitando assim a sua soldadura. Estas altas temperaturas resultam dos sucessivos impactos durante o processo de fragmentação onde estão envolvidas forças elevadas e um grande desgaste por parte dos elementos do rotor;

8. **Absorvor de vibrações:** os impactos e as grandes forças e velocidades envolvidas no processo de fragmentação induzem, inevitavelmente, altas vibrações à estrutura da máquina, que são transmitidas à base. Assim, surge a necessidade da existência de um absorvor de forma a evitar que tais vibrações se transmitam, por um lado, à infraestrutura, e por outro levem à degradação acelerada da máquina;
9. **Cabine de controlo:** contém uma consola de comando para se conseguir um controlo e comando total da máquina. (H. R. Manouchehri, 2007)



Figura 16. Absorvor de vibrações



Figura 17. Cabine de controlo

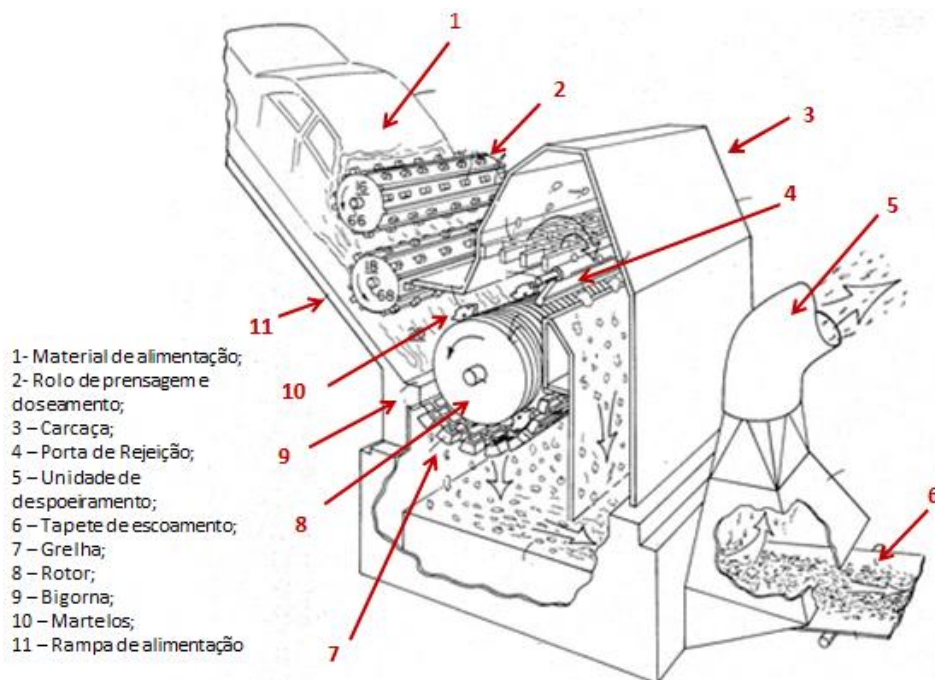


Figura 18 Esquema representativo de uma máquina fragmentadora com rotor horizontal de martelos (Alton S. Newell, 1985)

2.3.2 *Princípio de funcionamento*

As máquinas fragmentadoras de rotor de eixo horizontal, que possuem os martelos como elemento de fragmentação, têm um princípio de funcionamento idêntico, independentemente da configuração do rotor que possuem. A Figura 19 ajuda a perceber melhor esse princípio de funcionamento.

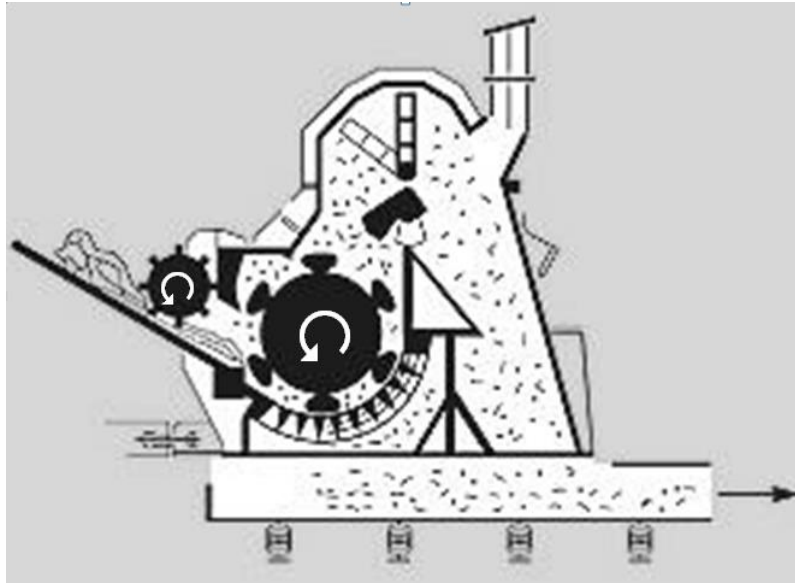


Figura 19. Máquina fragmentadora de rotor horizontal com martelos.
(Shredder Plant, 2014)

O material metálico a fragmentar é colocado na rampa de alimentação da máquina e, de seguida, é prensado pelo rolo de prensagem de doseamento, de forma a reduzir o seu volume, oferecer rigidez ao material e dosear controladamente a alimentação evitando atolamentos. Esta maior rigidez do material a fragmentar vai permitir a absorção de parte da energia que o martelo detém no momento de impacto deste com o material, garantindo assim que o processo de fragmentação ocorra mais eficazmente.

A elevada velocidade de rotação que esta máquina possui, cerca de 600 a 700 rpm, origina elevadas velocidades lineares periféricas nos elementos que se encontram mais próximo do perímetro do rotor, nomeadamente nos martelos. Por exemplo, para uma velocidade rotacional de 600 rpm e um diâmetro de rotor de 1200 mm atingem-se velocidades lineares nos martelos de 270 a 300 km/h.

Estas elevadas velocidades rotacionais aliadas à força inercial centrífuga fazem com que os martelos tomem a posição máxima, chocando com o material metálico, cortando-o em fragmentos de maior ou menor dimensão dependendo da velocidade de alimentação. É através da velocidade de alimentação do material que se consegue ter um controlo sobre a dimensão dos fragmentos: maior velocidade de alimentação origina fragmentos maiores, menor velocidade de alimentação origina fragmentos de menor dimensão.

Os fragmentos resultantes saem através das grelhas que se situam na parte inferior e superior de forma a seleccionar o tamanho dos fragmentos. O material metálico que o rotor, por alguma razão, não conseguiu fragmentar sai para o exterior pela porta de rejeição que se encontra na parte superior da máquina.

Para se ter uma ideia da capacidade de produção deste tipo de máquina fragmentadoras, são apresentados de seguida cálculos assumindo valores de velocidade de rotação e de dimensão pretendida dos fragmentos.

$$\omega = 600 \text{ rpm} = 10 \text{ rot/s} = 1 \text{ rot em } 100 \text{ ms}$$

Assumindo que o rotor tem 6 conjuntos de martelos por plano, pode-se concluir que em cada rotação se têm 6 martelos a cortar material.

$$\text{tempo entre a passagem de cada martelo na bigorna: } \frac{100 \text{ ms}}{6} = 16,66 \text{ ms}$$

Se pretendermos fragmentos a ser cortados de 2 em 2 mm, então terá que se avançar o material esses 2mm, durante o tempo entre cada martelo, o que resulta numa velocidade de alimentação de:

$$v_{\text{alimentação}} = \frac{2 \text{ mm}}{16,66 \text{ ms}} = 0,12 \text{ mm/ms} = 120 \text{ mm/s}$$

Se considerarmos que um automóvel tem um comprimento nominal de 3m e 1 tonelada de massa então pode-se calcular de uma forma muito aproximada e rápida a capacidade de produção para estes valores:

$$v_{\text{alimentação}} = 7\,200 \text{ mm/min} \approx \text{mais de 2 automóveis num minuto}$$

$$\text{capacidade de produção} = 2 \text{ ton/min} = 120 \text{ ton/h} = 120 \text{ automóveis /h}$$

Com esta analogia da capacidade de produção para automóveis consegue-se melhor compreender a grande produtividade e eficácia destas máquinas. Através da capacidade de produção pode-se concluir que se trata de uma máquina fragmentadora de classe grande (segundo a classificação do capítulo 2.1 *Classificação das máquinas fragmentadoras*).

2.3.3 Principais caraterísticas

As máquinas fragmentadoras têm vindo a ser melhoradas de forma progressiva, com o objetivo de aumentar a sua produtividade e obter o máximo retorno económico. Estas são máquinas que trabalham a grandes velocidades periféricas e possuem elementos constituintes com elevada massa. Tais atributos resultam em caraterísticas importantes da máquina, enunciadas de seguida:

- Energia: as grandes potências envolvidas resultam num consumo energético associado a estas máquinas bastante elevado;
- Controlo: devido à possibilidade dos materiais a fragmentar poderem ter muito elevada capacidade de resistência ao impacto, a máquina pode entrar em situação de saturação. Nestes casos, a máquina pode entrar em condição limite de funcionamento e ações de controlo de emergência são necessárias ser previstas;
- Vibrações: a rigidez e massa associadas às altas velocidades podem gerar na estrutura da máquina elevadas vibrações, em volta de frequências próprias de vibração estrutural, que devem ser reduzidas o mais possível para que não sejam transmitidas às fundações da máquina fragmentadora;
- Operação periódica de manutenção: do funcionamento por impacto da máquina resultam elevados choques entre os fragmentos e as partes da máquina com as quais entram em contacto. Daqui resultam danos em todos estes componentes estruturais, nomeadamente os martelos, a bigorna, as placas estruturais e as capas de proteção. Todos estes componentes têm que ser substituídos periodicamente. O procedimento de manutenção da máquina é, no entanto, um processo demorado e delicado devido mais uma vez à dimensão, à massa e à localização dos componentes da máquina que necessitam ser substituídos;
- Segurança: o processo de manutenção, uma vez que é realizado no interior da máquina fragmentadora, conduz a problemas delicados de segurança para os operários;

2.3.4 Manutenção do equipamento

Os problemas existentes na operação de manutenção periódica das máquinas de fragmentação são um dos pontos de grande preocupação porque têm um impacto muito negativo na produtividade e eficiência da máquina.

A necessidade deste processo resulta do elevado desgaste dos elementos da máquina aquando do impacto com o material metálico no momento da fragmentação, que acontece devido às grandes velocidades, forças e rigidez dos materiais envolvidos. Este desgaste provoca desequilíbrios a nível de momento de inércia no rotor resultando em instabilidades que são transmitidas à estrutura da máquina, diminuindo assim a sua vida útil. Outra das consequências é a diminuição da produtividade da máquina. O desgaste dos martelos faz com que estes não cortem corretamente o material podendo atingir, quando o desgaste é elevado, a fase de ausência de fragmentação (inexistência de contato entre o martelo e o material).

Assim, é necessária a substituição destes elementos para garantir a estabilidade da máquina e a sua adequada eficácia. Os elementos (os martelos, as “capas”, os veios sobre os quais articulam e as placas de desgaste) podem ser substituídos ou, quando o desgaste do elemento de corte não é muito grande, pode ser invertido, mudando o lado de ataque ao material.

Atualmente, o procedimento de manutenção dos elementos do rotor consiste em retirar, com a ajuda de um sistema hidráulico, cada um dos veios onde articulam os martelos e estão suportadas as “capas”, libertando assim cada uma destas peças (Figura 20). Estas peças têm de ser individualmente retiradas na vertical com o auxílio de um guincho, devido à sua elevada massa (cerca de 50 a 80 kg). Isto significa que, em cada momento, as operações têm que ser realizadas somente sobre o veio que está orientado para o nível mais superior do rotor, como se pode ver na Figura 20. Cada veio onde as peças estão acomodadas é extraído passo a passo, de modo a permitir a remoção de peça por peça, e um de cada vez. Todo este procedimento tem de ser repetido 6 vezes, um para cada veio. Este processo é realizado no interior da máquina, dentro da carcaça do rotor, uma vez que a movimentação deste para o exterior é bastante complexa. Tal facto deve-se à grande dimensão do rotor (cerca de 1,20 m de diâmetro e 2,10 m de comprimento) e à sua elevada massa (cerca de 20 a 30 toneladas).



Figura 20. Sistema hidráulico de remoção dos veios para manutenção do rotor (Shredder Plant, 2014)

A complexidade das operações de manutenção decorre sobretudo da grande dimensão e massa quer das peças, que necessitam ser substituídas, quer dos veios, e do facto de o rotor estar na posição horizontal e no interior da máquina. Outro dos problemas presentes que também contribuem para a dificuldade da operação é a coaxialidade dos veios do rotor na operação de manutenção, dado o seu extenso comprimento. Esta coaxialidade resume-se à colocação correta do veio nos orifícios a ele destinados no rotor, e conseguir aliar ainda a colocação dos martelos e capas no mesmo veio, de forma a existir uma coaxialidade de todas as peças.

Este procedimento de manutenção obriga toda a máquina, e a empresa, a parar por um período de 3 a 4 dias, tendo um impacto negativo na rentabilidade da máquina fragmentadora dada a capacidade de produção diária, como referido no capítulo 2.3.2 *Princípio de funcionamento*. Caso seja necessário realizar uma operação de manutenção por mês, e esta demore 4 dias, pode representar cerca de 15% de imobilização da produção. Por esta razão o procedimento de manutenção é tendencialmente retardado o mais possível, de forma existir o menor número de quebras de produção.

A segurança é, também, um outro ponto importante que se pretende analisar. Tal como foi referido, o processo de remoção ou colocação das peças a substituir é realizado no interior da máquina, ou seja, o operário tem de permanecer dentro da carcaça da máquina. Tratando-se esta de uma máquina com grande atravancamento e sem quaisquer proteções de segurança no seu interior, impõe-se inevitavelmente grandes ações de segurança que necessitam ser resolvidas.

Pode-se, assim, destacar este ponto, a manutenção do equipamento, como um ponto de extrema importância e que causa grandes impactos negativos em todo o processo de fragmentação. O facto de ser um processo bastante complexo e moroso resulta num adiamento da decisão de paragem da máquina, o que por vezes faz com que o rotor seja levado ao limite da sua produção e estabilidade resultando assim numa deterioração mais acelerada da máquina. A questão da segurança acrescenta ainda mais preocupação a este

ponto, sendo por isso necessário encontrar uma nova solução para o processo de manutenção que diminua ou até mesmo elimine os problemas que o atual processo acarreta.



Figura 21. Operador durante processo de manutenção.

3. Conceção de uma solução alternativa para o processo de manutenção

Tendo em atenção as dificuldades e tempos associados ao processo de manutenção periódica das partes degradáveis da máquina, pretende-se conceber uma solução alternativa para este processo de modo a facilitar a tarefa de manutenção do rotor, que consiste na substituição dos martelos, das capas e dos veios onde estes articulam.

3.1 Requisitos

Avançam-se com os seguintes requisitos para encontrar uma solução de forma a se conseguir uma maior eficácia do sistema de manutenção, menores tempos mortos de produção e, por conseguinte, uma maior produtividade da máquina:

1. Obter uma redução do tempo despendido na manutenção da máquina para cerca de 1/3 do tempo atual, ou seja, passar de 3 dias para 1 dia de interrupção de funcionamento da máquina;
2. Reduzir a complexidade do processo que envolve retirar os martelos e as capas de proteção do rotor;
3. Aumentar a segurança dos trabalhadores durante a operação de manutenção;
4. Compatibilizar o sistema com o funcionamento da máquina fragmentadora, não exigindo operações de instalação e desinstalação de equipamentos.
5. Eventual custo acrescido do sistema alternativo de manutenção ser facilmente recuperável pelos proveitos associados a menores paragens de produção.

3.2 Definição dos movimentos a integrar na solução

A solução alternativa para a realização da operação de manutenção assenta essencialmente na capacidade de se retirar o rotor da máquina e realizar a manutenção deste no exterior da máquina.

Assim, é proposto o desenvolvimento de uma solução em que se pretende criar:

- **Elevador hidráulico:** para acomodar o rotor quando retirado da máquina e assim permitir a sua manutenção numa posição vertical totalmente controlável;
- **Guincho:** sistema constituído por cabos e respetivo tambor, que permite articular o rotor desde a posição horizontal até à posição vertical.

Para além disso deve ser considerada a existência de duas plataformas, uma superior e outra inferior, de maior dimensão, para que os operadores possam realizar a manutenção do rotor a diferentes níveis quando este se encontra na vertical. (Figura 22 e Figura 23)

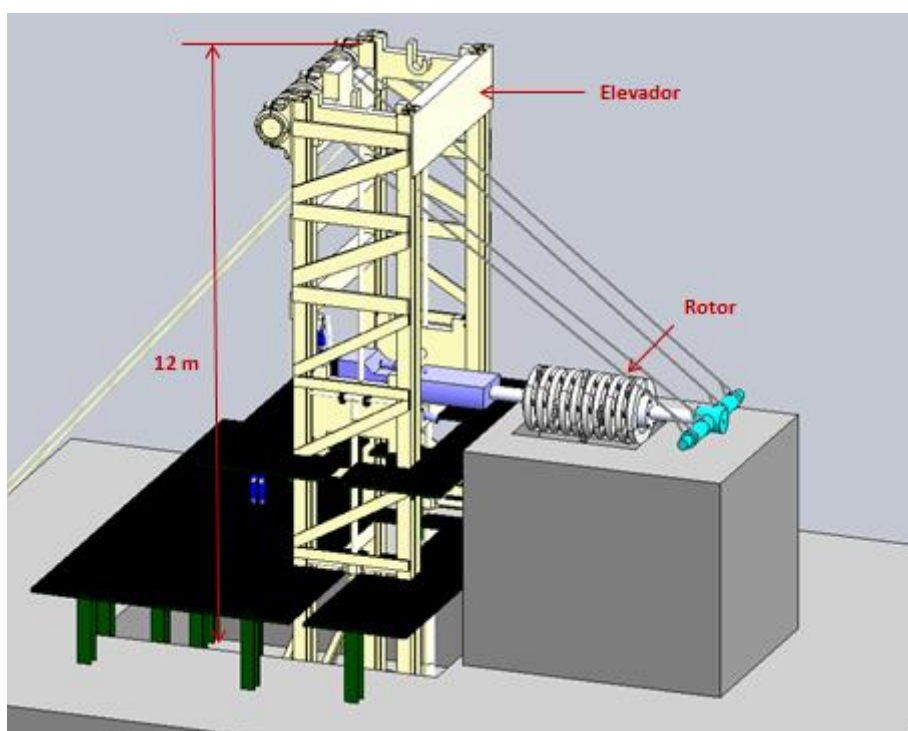


Figura 22 Vista geral da solução

O elevador hidráulico encontra-se posicionado na lateral em relação à máquina e permite que o rotor seja deslocado diretamente da máquina para o elevador, ficando assim colocado no seu interior. Esta movimentação para a posição vertical é auxiliada pelo guincho constituído por tambores e cabos metálicos associados.

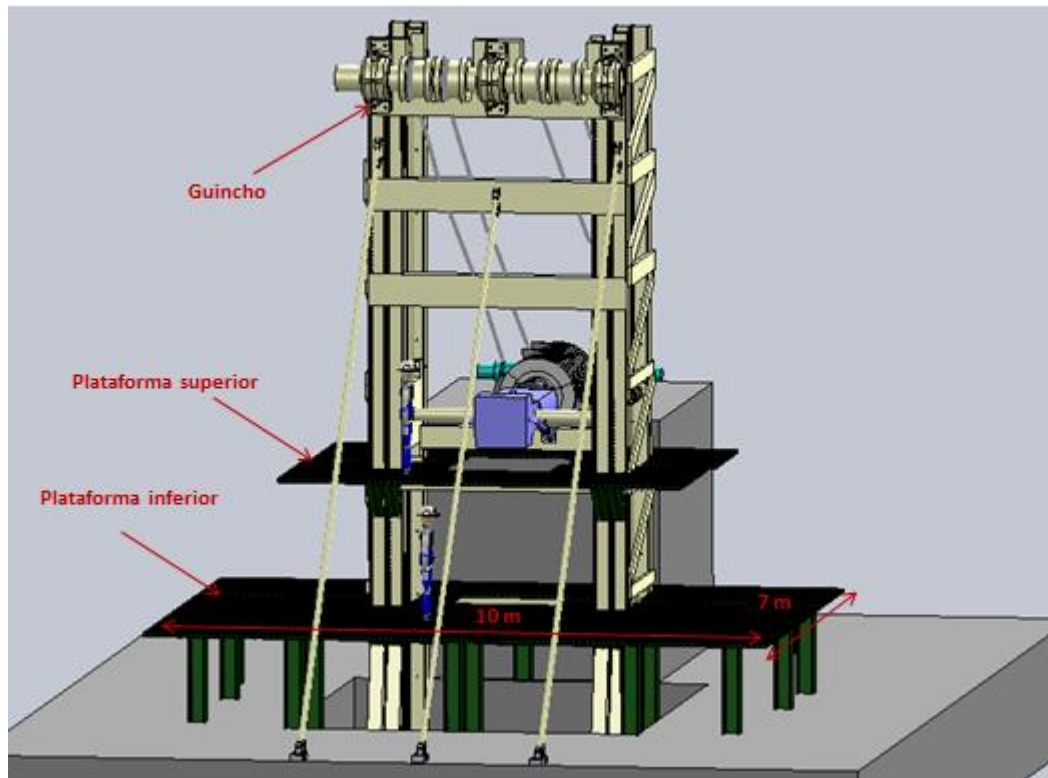


Figura 23. Vista geral da solução com dimensões globais.

3.2.1 *Movimentação do rotor*

A solução proposta para o sistema de movimentação do rotor para o exterior da máquina fragmentadora desenvolve-se em etapas na seguinte sequência:

1. **Movimento linear ascendente:** este movimento linear e vertical é necessário para garantir a total libertação do rotor da máquina antes de se iniciar qualquer movimento angular. Trata-se de um pequeno deslocamento, cerca de 150 mm, no sentido ascendente que é conseguido através de um movimento combinado do elevador e do guincho. No guincho os cabos encontram-se tensionados de forma a se conseguir um deslocamento vertical do rotor; (Figura 24 e Figura 25)

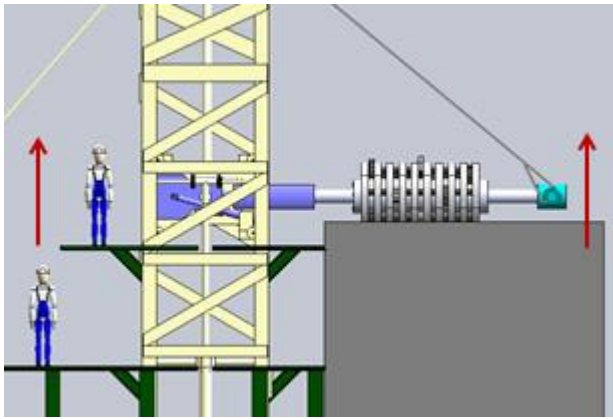


Figura 24. Rotor durante o movimento ascendente.

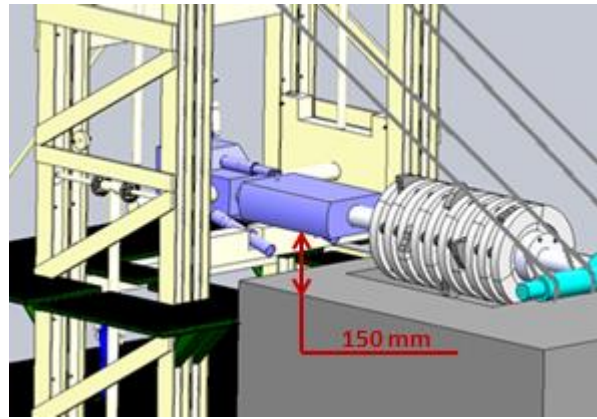


Figura 25. Vista em pormenor do rotor na posição final após o movimento ascendente.

2. **Movimento angular:** para que não exista contacto do rotor com a carcaça da máquina durante a sua movimentação para o interior do elevador é necessário um pequeno movimento angular inicial. Esta rotação, de cerca de 10° , é realizada pelo guincho exclusivamente; (Figura 26)

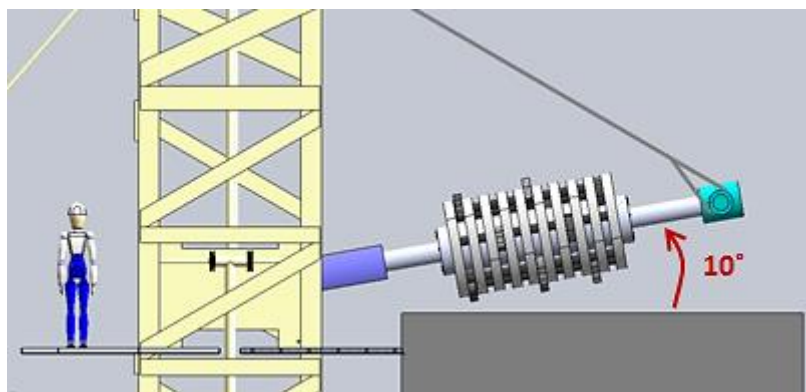


Figura 26. Posição final do rotor após o movimento angular.

3. **Movimento linear descendente combinado com movimento angular:** o movimento para colocar o rotor na posição vertical no interior do elevador combina um movimento angular com uma translação vertical. Este movimento é conseguido pela sincronização do movimento do guincho com o movimento do elevador. (Figura 27)

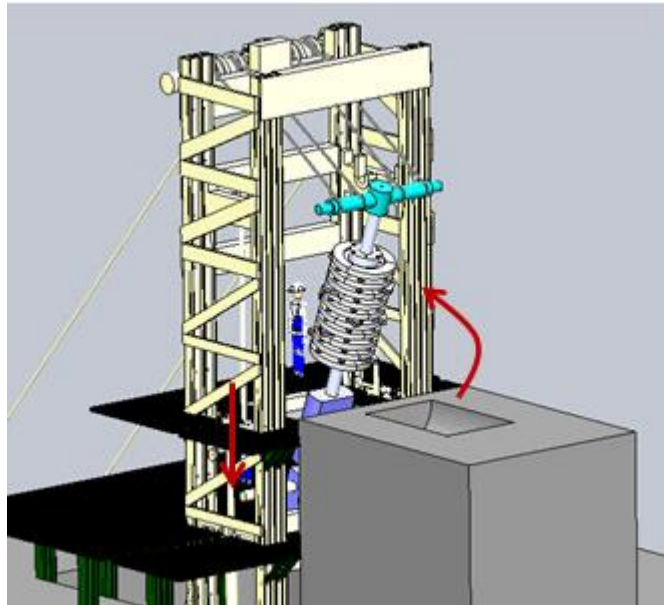


Figura 27. Vista global durante movimento combinado.

4. **Movimento angular:** na parte final do movimento angular, os cabos perdem tensão devido ao facto do rotor se encontrar perto dos 90° , deixando de conseguir assegurar a rotação pretendida. Para ultrapassar este problema existem dois cilindros hidráulicos na parte inferior do rotor que vão garantir a articulação final, deslocando o rotor para a posição vertical. O sistema termina o movimento quando a peça superior do rotor encontra o batente existente no elevador, garantindo assim que este se encontra na posição vertical de um modo positivo. Por fim, de forma a assegurar o guiamento do rotor no elevador, este faz um movimento vertical através do recuo da peça inferior, incorporada na mesa do elevador; (Figura 28, Figura 29, Figura 30)

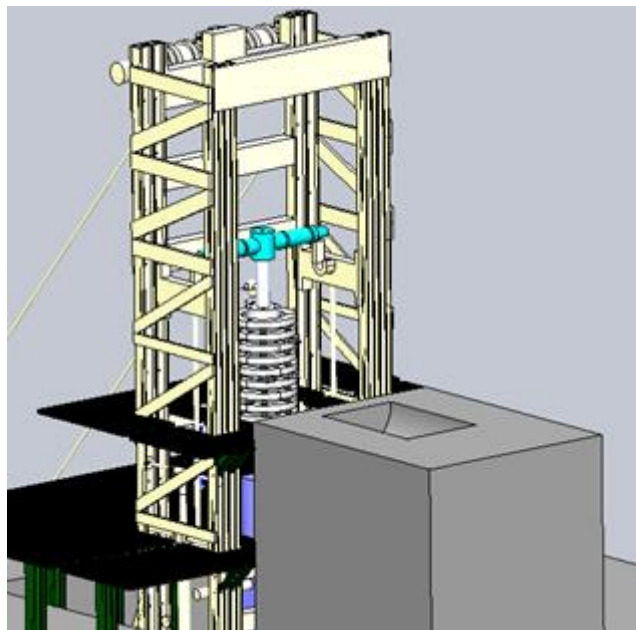


Figura 28. Rotor na posição vertical após o movimento combinado.

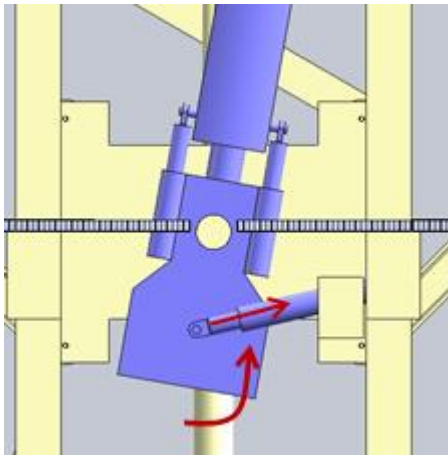


Figura 29. Vista em detalhe dos cilindros hidráulicos na parte final do movimento.

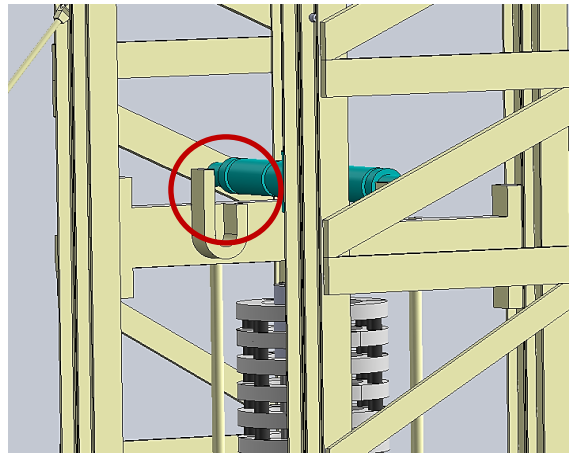


Figura 30. Vista em detalhe do batente no elevador.

5. **Movimento linear ascendente e descendente:** movimento realizado pelo elevador para colocar o rotor nas várias posições que permitem ao operador, que se encontra numa das plataformas, proceder à sua manutenção. O guincho acompanha estes movimentos, para que não exista a possibilidade de os cabos tentarem retirar o travessão superior do rotor; (Figura 31, Figura 32)

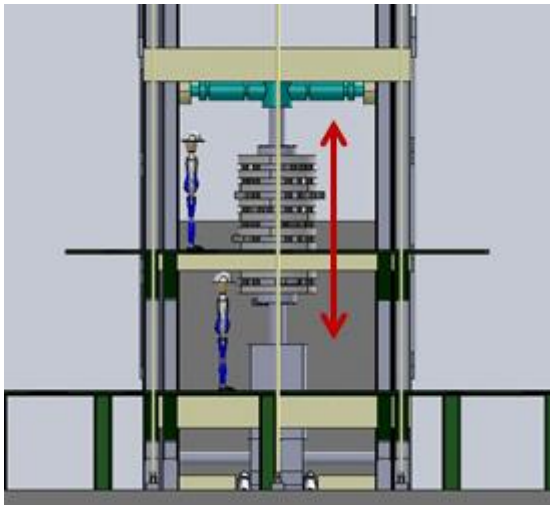


Figura 31. Rotor na posição de manutenção.

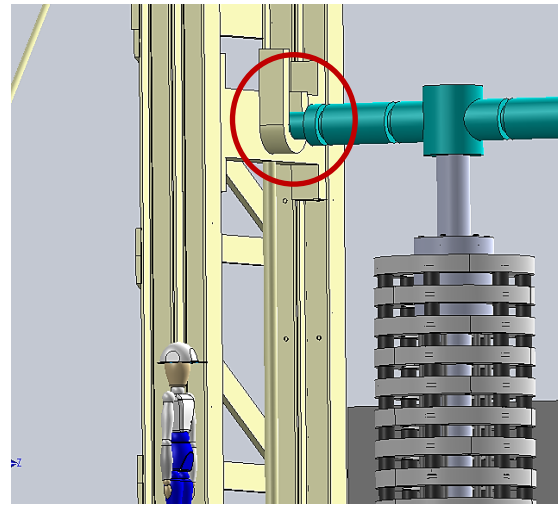


Figura 32. Vista de detalhe do rotor colocado no guiamento.

6. **Movimento de angular:** após a operação de manutenção do rotor estar concluída, é necessário voltar a colocar o rotor dentro da máquina. Primeiro o rotor é elevado até à posição de início de movimento de descarga. Depois os atuadores hidráulicos da mesa do elevador fazem o movimento de avanço ficando assim o rotor livre do guiamento associado ao batente. Uma vez que os cabos não conseguem estar tensionados com o rotor na vertical, é necessário fazer uma pequena rotação inicial antes do movimento de recuo para que o desenrolamento dos cabos se faça em permanente estado de tensionamento. O movimento angular inicial é, assim, assegurado pelos cilindros hidráulicos de

articulação da mesa do elevador, já referidos anteriormente, que avançam gerando assim uma articulação até cerca de 10° no rotor, no sentido negativo; (Figura 33 e Figura 34)

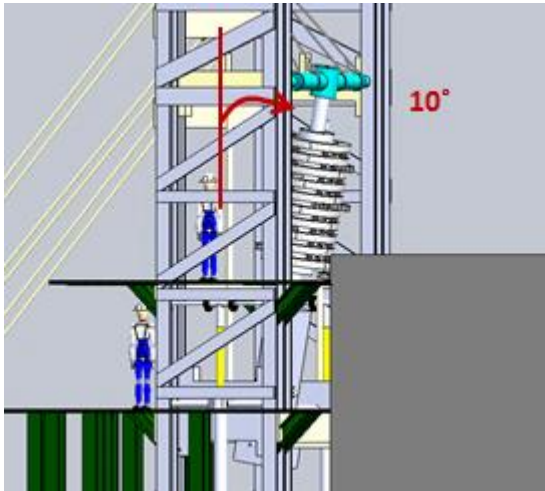


Figura 33. Movimento angular

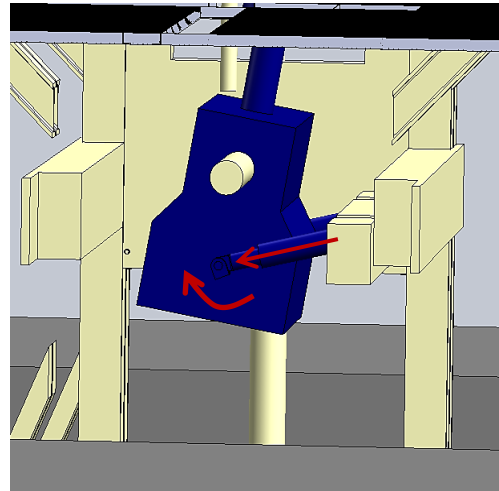


Figura 34. Vista em detalhe dos cilindros hidráulicos de articulação da mesa.

- 7. Movimento linear ascendente combinado com movimento angular:** o movimento para colocar o rotor novamente na posição horizontal combina uma rotação, conseguida através do sistema de cabos, com uma translação ascendente por parte do elevador. De forma a auxiliar o movimento dos cabos na rotação do rotor, esse movimento é acompanhado por uma ação frenante dos cilindros hidráulicos articulação da mesa, reduzindo assim o esforço presente nos cabos; (Figura 35)

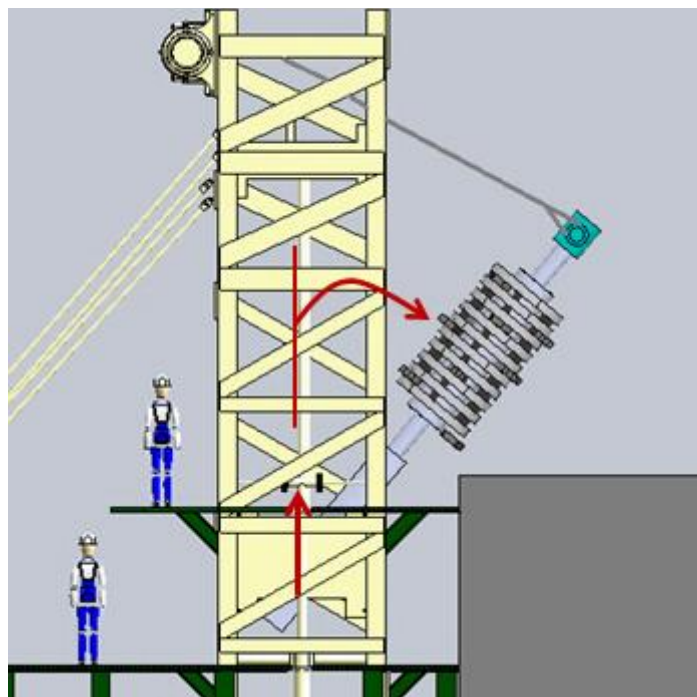


Figura 35. Rotor durante o movimento combinado.

8. **Movimento linear descendente:** depois de o rotor se encontrar na posição horizontal é necessário um pequeno movimento descendente, de cerca de 150 mm, para o encaixe correto do rotor dentro da máquina fragmentadora. Este movimento é conseguido, à semelhança do primeiro, com a sincronização do guincho e do elevador, de forma a criar uma translação vertical; (Figura 36)

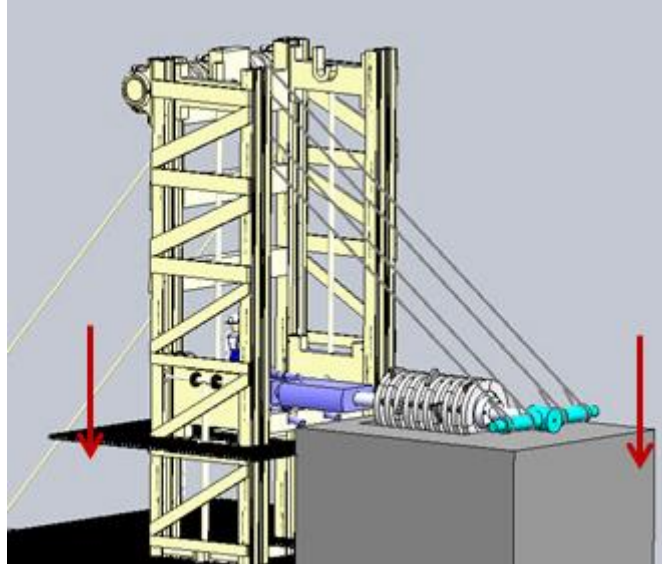


Figura 36. Movimento descendente.

3.2.2 Procedimento de Manutenção

O equipamento descrito no ponto anterior, que permite que o rotor seja colocado na posição vertical, abre novas possibilidades à forma de se encarar o procedimento de manutenção do rotor, ou seja, a substituição dos martelos, capas de proteção e veios de articulação.

Esta orientação vertical do rotor, no entanto, colide com a necessidade de se retirarem os veios de articulação dos martelos, que são de grande extensão (de um extremo ao outro do rotor, ou seja, cerca de 2,10 m). Com estes veios a operação de manutenção seria quase impossível, uma vez que se necessitaria de uma grande altura para retirá-los e implicaria que os componentes a substituir fossem retirados de baixo para cima, procedimentos completamente impossíveis.

Assim, propõe-se uma alteração significativa na concepção do rotor de modo a que estes veios articulados deixem de ser contínuos e da dimensão do rotor, mas passem a ser seccionados para a dimensão de cada secção de martelos.

3.2.2.1 Nova concepção de rotor

A solução para o sistema de movimentação de rotor foi desenvolvida considerando uma nova concepção de rotor. Esta solução é totalmente nova, concebida para que o procedimento de manutenção seja menos complexo e o peso do próprio rotor seja menor, comparativamente com as configurações convencionais.

O rotor, apresentado na Figura 37, tem a dimensão de 1200 mm de diâmetro, 2100 mm de comprimento e uma massa aproximada de 17 toneladas. Para melhor compreender a sua estrutura a Figura 38 mostra a secção em corte do rotor pelo seu eixo de revolução.

Esta estrutura é composta por discos divididos em três setores idênticos que se encontram encaixados entre duas peças centrais através de uma geometria que permite esse perfeito encaixe. Os veios que suportam os martelos são seccionados estando posicionados entre cada um dos setores de cada disco, sendo que cada nível (cada plano composto por martelos) possui 6 veios. A solidez de toda a estrutura é conseguida através de seis tirantes que vão de um extremo ao outro do rotor e cruzam quer as placas, quer as peças centrais.

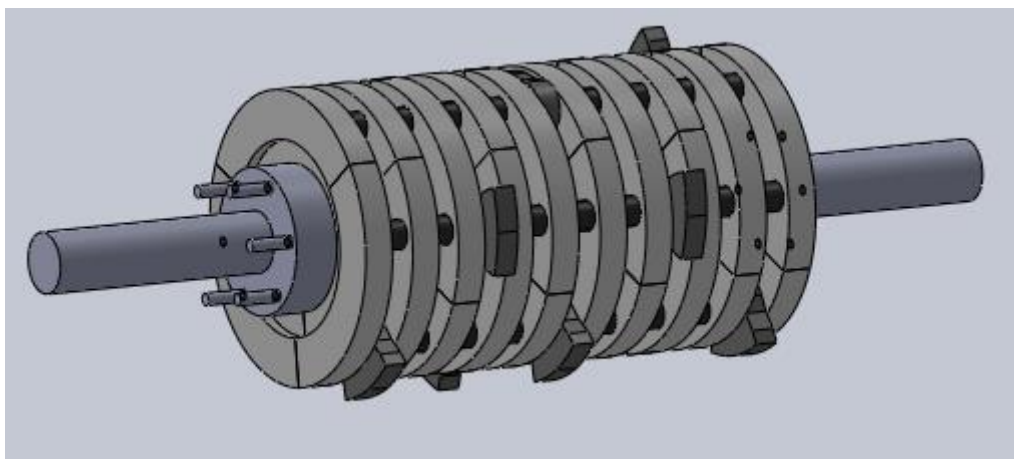


Figura 37. Nova concepção de rotor.

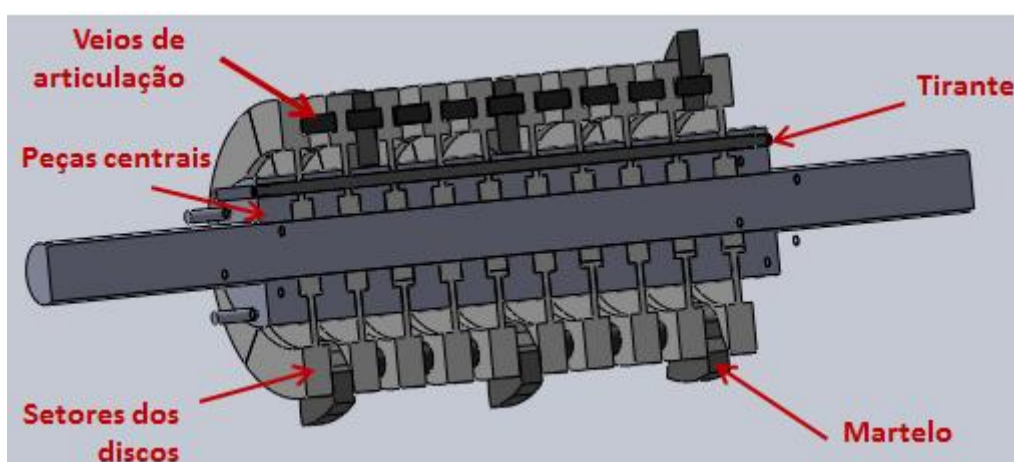


Figura 38. Vista em corte ao centro do rotor

Esta nova concepção de rotor implica que o procedimento de manutenção ocorra por níveis a partir do nível mais superior até o nível mais inferior. A Figura 39 permite compreender melhor como esta operação de manutenção, por níveis, se desenvolve com a estrutura do rotor.

A substituição dos martelos faz-se nível a nível, ou seja, todos os martelos que se encontram no mesmo plano horizontal são substituídos na mesma operação de manutenção. Para se conseguir esta manutenção por níveis, os veios são seccionados, como foi referido, e os setores são deslocáveis de forma a criar espaço entre o nível superior e o nível em que se pretende retirar o martelo. A deslocação destes setores é conseguida através do deslizamento sobre os tirantes, que permitem a consolidação do rotor e, por esta mesma razão, é colocado em cada tirante uma extensão roscada de forma a garantir sempre o guiamento das placas ao longo do seu deslocamento.

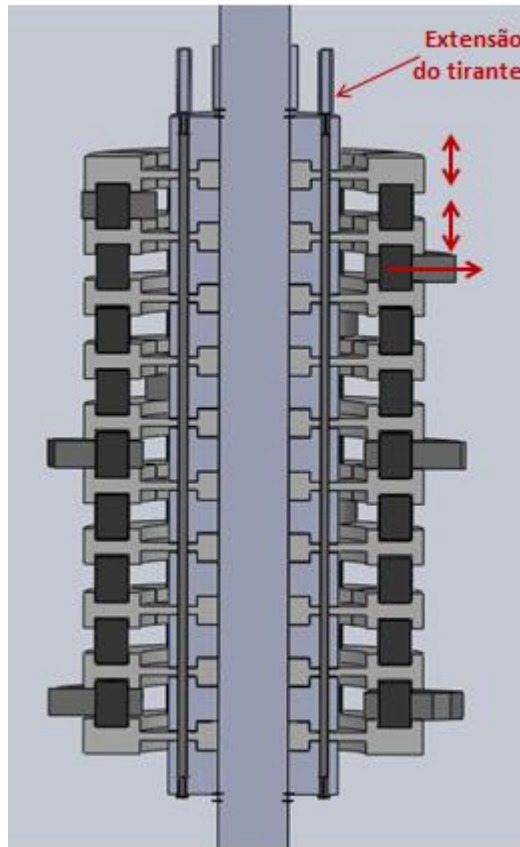


Figura 39. Vista em corte do rotor na sua posição de manutenção.

3.2.2.2 Operações de manutenção

Este novo procedimento permite que as operações de manutenção sejam realizadas com maior facilidade por um operador. Estas operações são auxiliadas por 6 macacos hidráulicos compactos que são colocados entre os setores dos discos do rotor, implicando a sequência de operações:

1. **Colocação dos macacos hidráulicos:** no nível que se deseja substituir os martelos são colocados os 6 macacos hidráulicos pelos operadores, tendo sido previamente folgados os tirantes que atravessam o rotor de um extremo ao outro e colocadas as respetivas extensões roscadas. Cada conjunto de 2 macacos é colocado em cada um dos setores que compõem cada nível. (Figura 40);

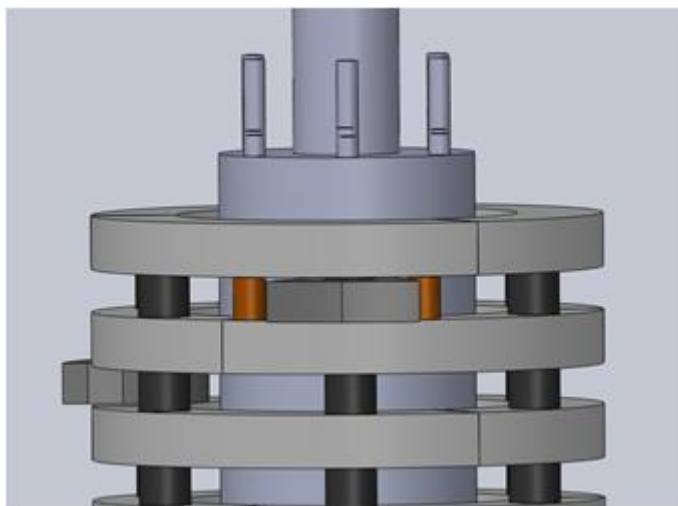


Figura 40. Macaco hidráulico (cor de laranja) colocado no interior do rotor.

2. **Movimentação ascendente:** após a colocação dos macacos hidráulicos estes vão avançar elevando assim todos os setores que se encontram acima, criando então o espaço necessário para a substituição dos martelos, capas de proteção e veios (Figura 41). Este movimento ascendente das partes do rotor é possível porque todos os componentes elevados deslizam nos tirantes, ou seja, como os tirantes se encontram folgados os componentes encontram-se livres para translação vertical.

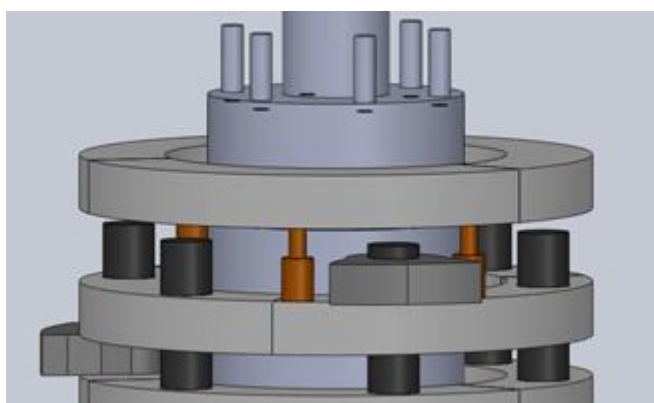


Figura 41. Posição final dos macacos, após movimento ascendente.

3. **Substituição dos martelos, capas de proteção e veios;**
4. **Movimento descendente:** depois da substituição dos elementos é necessário voltar a colocar os componentes na posição inicial, ou seja fazer o movimento inverso do ponto 2. Neste movimento, os macacos hidráulicos recuam em simultâneo, descendo os componentes, colocando-os na posição inicial novamente; (Figura 42)

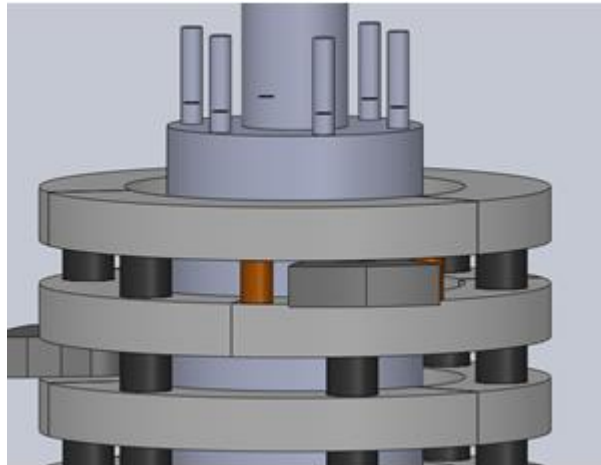


Figura 42. Movimento descendente.

Para cada nível do elevador é necessário repetir este procedimento do ponto 1 ao ponto 4, para assim se conseguir a substituição de todos os martelos, capas de proteção e veios.

A substituição dos martelos é efetuada da parte superior para a parte inferior do rotor, dividindo-se em duas partes, a substituição dos martelos das primeiros quatro níveis superiores faz-se com o operador na plataforma superior, e a substituição dos restantes é realizada com o operador na plataforma inferior. (Figura 43)

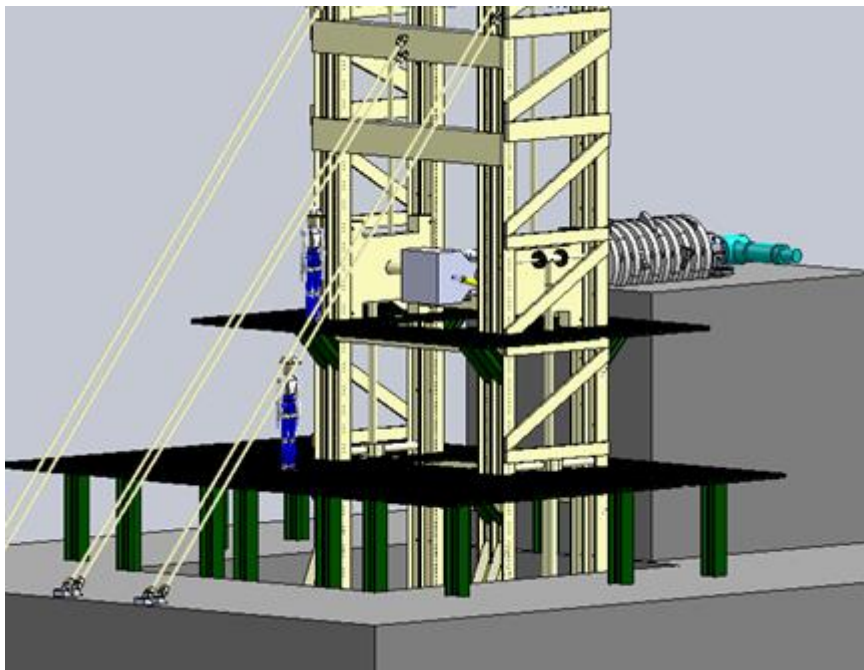


Figura 43. Vista geral da solução com as plataformas.

Esta divisão das operações em duas plataformas deve-se ao facto de que nos níveis inferiores, quando os cilindros tiverem que elevar grande parte do rotor, o rotor não aguentar as forças que vão estar a ser exercidas nos níveis abaixo, uma vez que não existe reação suficiente da estrutura. (Figura 44). Para resolver esse problema existem dois

batentes na posição mais inferior do rotor que irão ajudar a suportar o esforço descarregado pelos cilindros nos níveis inferiores. (Figura 45)

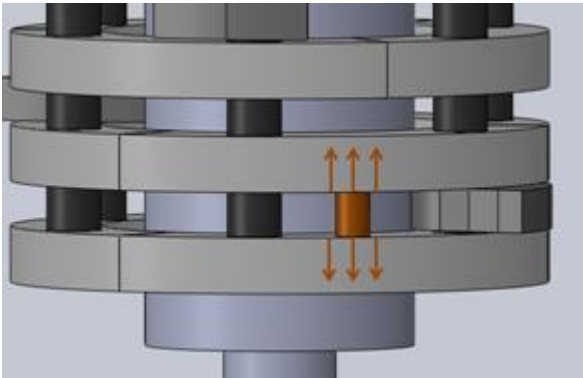


Figura 44. Esquema representativo das forças exercidas pelo cilindro hidráulico.

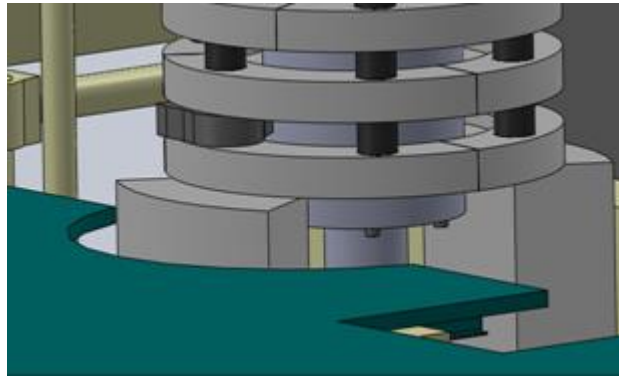


Figura 45. Rotor na sua posição mais inferior e respetivos batentes.

3.3 Análise da solução proposta

Um dos pontos de extrema importância na análise da solução é o tempo despendido no procedimento de manutenção. Existem duas ocasiões relevantes no procedimento em que se verifica que o tempo total de manutenção neste sistema é substancialmente menor que o tempo total do processo atual. A primeira é no facto do processo de manutenção ser de uma complexidade muito menor que o atual, todas as operações realizadas pelo operador são sobre uma plataforma e ao nível deste e não no interior da máquina sobre o rotor. A diminuição da complexidade deve-se ainda ao fim da necessidade de retirar todas as peças e à eliminação dos problemas de coaxialidade dos veios que alojam os martelos, conduzindo assim a uma redução significativa no tempo. A segunda situação prende-se com a capacidade de se conseguir simultaneidade na manutenção do rotor e dos restantes componentes (grelhas e placas de desgaste do interior da fragmentadora), reduzindo assim o tempo total de manutenção apenas para o tempo das operações mais morosas.

Outro dos aspetos importantes a analisar na solução é o espaço de trabalho dos operadores e a sua inerente segurança no processo de manutenção. Os problemas de segurança presentes atualmente foram praticamente eliminados com a movimentação do rotor para o exterior da máquina. Além disso o espaço de trabalho foi melhorado com a criação de uma plataforma em torno do elevador hidráulico. Esta plataforma é vantajosa quer para os operadores, quer para a colocação de todos os componentes e ferramentas necessárias ao processo de manutenção.

O sistema de movimentação do rotor apresentado cumpre um outro requisito: toda a estrutura de auxílio à manutenção é compatível com o normal funcionamento da máquina fragmentadora não necessitando de operações de instalação e desinstalação de equipamentos. Requisito esse também importante principalmente numa solução desta dimensão e complexidade. Os únicos componentes necessários colocar e retirar são apenas as peças dos extremos do rotor que não são de grande dificuldade de montagem.

A existência da plataforma e o facto de o rotor se encontrar na posição vertical são mais duas vantagens deste sistema. Uma dessas vantagens é a possibilidade de existirem mais operadores no mesmo espaço já que há um aumento da área de trabalho (acesso livre de 360° ao rotor), o que contribui também para a redução do tempo de manutenção. A outra vantagem é a diminuição dos esforços por parte dos operadores na substituição das peças. Uma vez que o rotor, ao se encontrar no elevador, poderá ser deslocado de forma que a peça que se pretende substituir fique ao nível do operador, facilitando-se o processo de substituição.

A análise ao sistema para movimentação do rotor para o exterior da máquina fragmentadora permite concluir que a solução apresentada alcança todos os requisitos enumerados no capítulo 3.1 *Requisitos* e ainda acrescenta eficiência ao processo para além do especificado. Para além disso, esta nova solução tem uma característica muito importante

e vantajosa: flexibilidade do processo de manutenção. Ou seja, uma vez que o tempo despendido na manutenção é agora menor e há a possibilidade de escolha dos martelos a substituir, há uma maior flexibilidade do momento de paragem da máquina para o processo de manutenção, permitindo assim que a eficiência da máquina seja mantida de uma forma constante.

3.4 Desenvolvimento do sistema

3.4.1 Elevador hidráulico: estrutura e componentes

O elevador hidráulico presente na solução foi concebido com base nos elevadores hidráulicos telescópicos. Estes são constituídos por cilindros hidráulicos de simples efeito que estão ligados a um sistema de roldanas e cabos para alcançarem um efeito duplicativo do curso. O princípio de funcionamento consiste na movimentação da haste principal do cilindro (seta azul), que tem no seu extremo uma roldana onde articula um cabo com um dos extremos fixo. O deslocamento da corrediça, que está associado ao outro extremo do cabo, vem assim duplicado: $h + h$ (seta castanha) (Figura 46). Ou seja, para um deslocamento h da haste do cilindro hidráulico dá-se um deslocamento $2xh$ na corrediça. Esta é a grande vantagem destes elevadores de efeito telescópico.

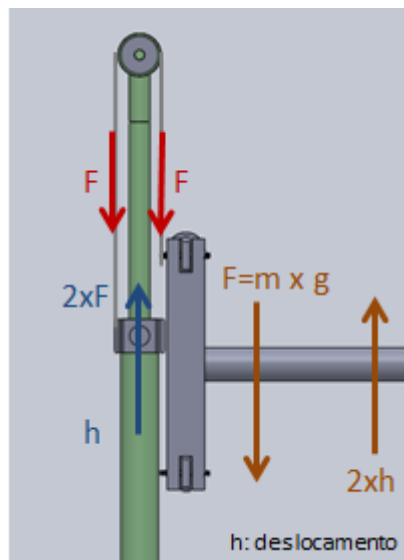


Figura 46. Esquema das forças e deslocamentos presentes num elevador hidráulico telescópico

A escolha por um elevador deste tipo deve-se exatamente à sua grande vantagem, que nesta solução em que é necessário um grande curso, cerca de 6 000 mm, ainda se torna mais importante.

3.4.1.1 Estrutura

O elevador hidráulico tem de largura de cerca de 2m de forma a conseguir envolver o rotor com diâmetro de 1,2 m e ainda conseguir ter espaço suficiente para a manutenção do mesmo. Quanto ao comprimento de 4 m, esta é uma dimensão imposta pelo sistema de tambor e cabos devido à dimensão do tambor e ao travessão que é colocado no rotor para acomodar os cabos. Quanto à altura do elevador, inicialmente a altura considerada foi de 10

m mas devido ao guiamento superior do rotor esta dimensão teve de ser aumentada para 12 m. (Figura 47)

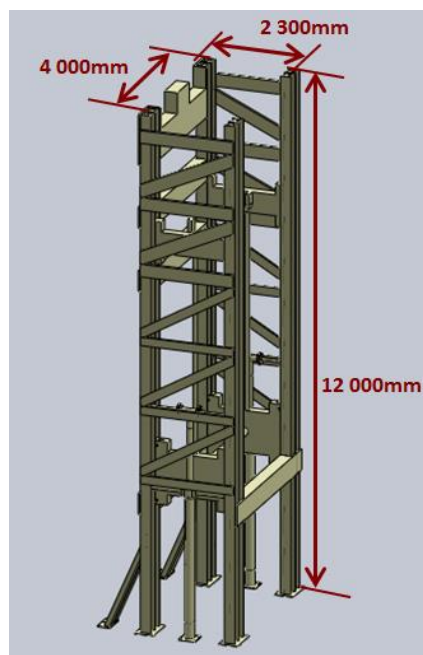


Figura 47. Elevador hidráulico e dimensões globais

A estrutura do elevador é constituída por quatro colunas, em que cada coluna é composta por dois perfis normalizados de ferro de forma a criar um plano para o guiamento do rotor ao longo do elevador e outro segundo plano para os cilindros hidráulicos, tal como mostra a Figura 48. Os perfis escolhidos foram perfis HEB 260 de ferro com 12 m de comprimento e com a norma DIN 1025. (B2Bmetal, 2014) A escolha por este tipo de perfil deve-se ao facto de este possuir uma alma de espessura superior o que, para este caso devido às forças presentes durante o processo, reduz o fenómeno de flexão. De forma a fortalecer ainda mais a alma do perfil, pelas razões já apontadas, foi adicionado ao perfil uma chapa em aço que é soldada a este e que tem uma superfície de maior dureza superficial para servir de superfície de rolamento dos rodízios associados à carruagem do elevador. Figura 49

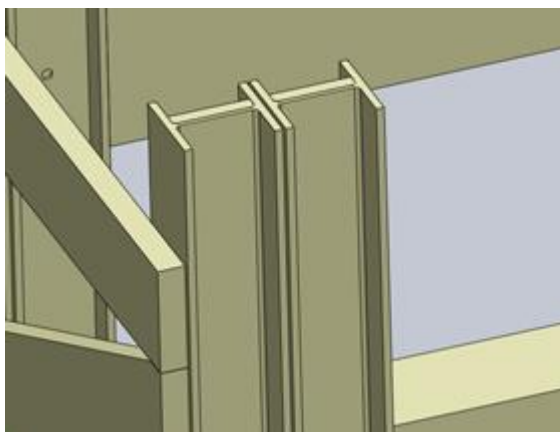


Figura 48. Vista em detalhe da coluna com os dois perfis H.

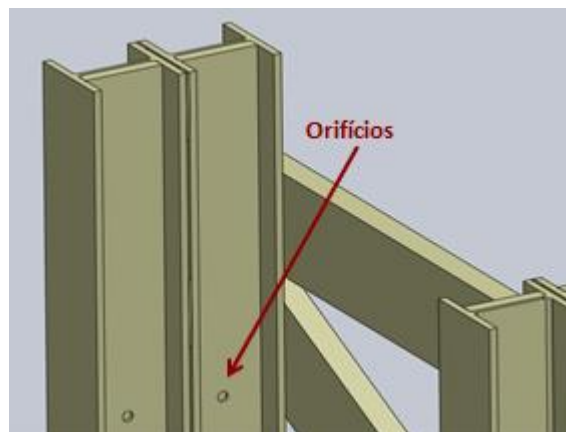


Figura 49. Vista em detalhe da coluna com o reforço da placa e os orifícios para soldadura.

Para a ligação rígida entre cada um dos perfis de cada coluna optou-se por colocar placas entre os dois perfis com um afastamento da face de 8 mm de forma a preencher com um cordão de soldadura de arco elétrico descontínuo. Figura 50

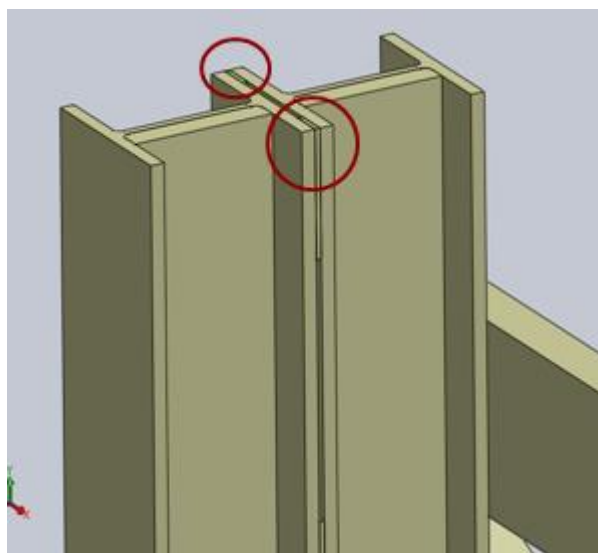


Figura 50. Vista em detalhe da soldadura entre os dois perfis

A consolidação de toda a estrutura do elevador é assegurada por travessas entre as colunas. Entre as duas colunas onde desliza o guiamento existe um reforço de travessas, com travessas horizontais e diagonais, de forma a conferir uma maior rigidez à estrutura, rigidez essa necessária para que o guiamento do rotor aconteça em perfeitas condições. Para além disso, as travessas no topo do elevador são de maior robustez uma vez que no extremo superior do elevador os fenómenos de encurvadura são mais propícios, principalmente quando estão presentes grandes alturas, como é o caso. (Figura 51)

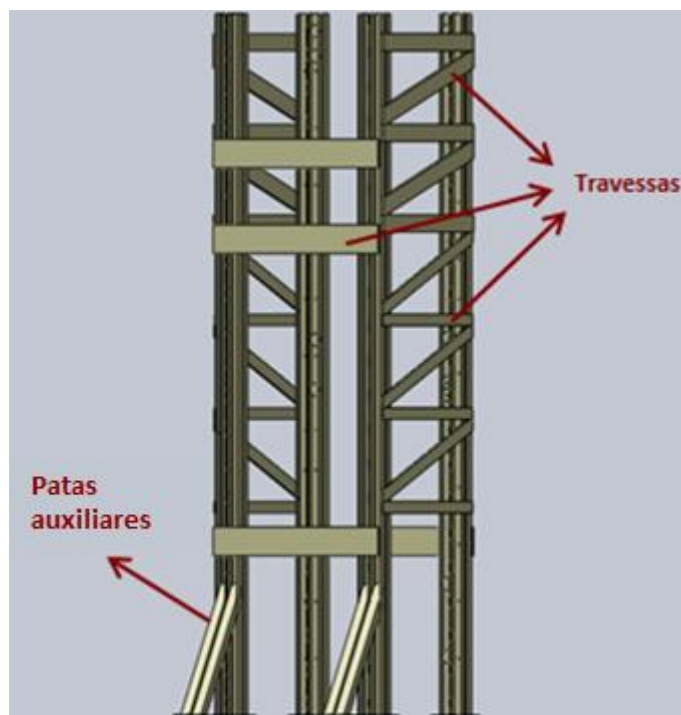


Figura 51. Estrutura do elevador.

As forças presentes durante o processo de movimentação do rotor para a posição vertical são sobretudo horizontais, tal como se pode ver no esquema da Figura 52 (cálculo da força F_2 descrito mais à frente no *capítulo 3.4.2 Extremidades do rotor*). Essas forças aliadas à grande altura do elevador obriga a que seja necessário fortalecer a estrutura nesse sentido, para tal foi adicionado ao elevador patas auxiliares na parte inferior (Figura 51) e tirantes de aço na parte superior (Figura 53). Os tirantes foram escolhidos tendo em conta as forças presentes na estrutura e sabendo que se trata de uma estrutura hiperestática de grau 2. A partir dos cálculos pelo Método das Forças Unitárias (Bonfim Barreiros) foi obtida uma força para os tirantes de cerca de 300 kN, ou seja, cerca de 100 kN em cada um, à qual corresponde um diâmetro de 27 mm. Por uma questão de robustez e do comprimento do tirante ser bastante extenso (de 11 750 mm), escolheu-se um diâmetro superior, de 52 mm. (Deha, 2014)

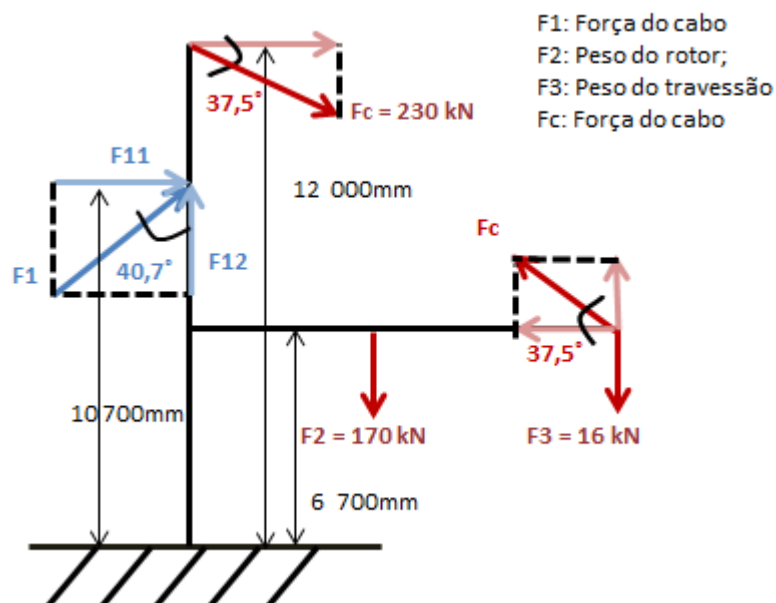


Figura 52. Esquema representativo das forças presentes na estrutura

Colocou-se cada tirante em duplicado para caso algum falhe exista sempre outro que sustente a estrutura do elevador (redundância) e assim não aconteçam situações de perigo.

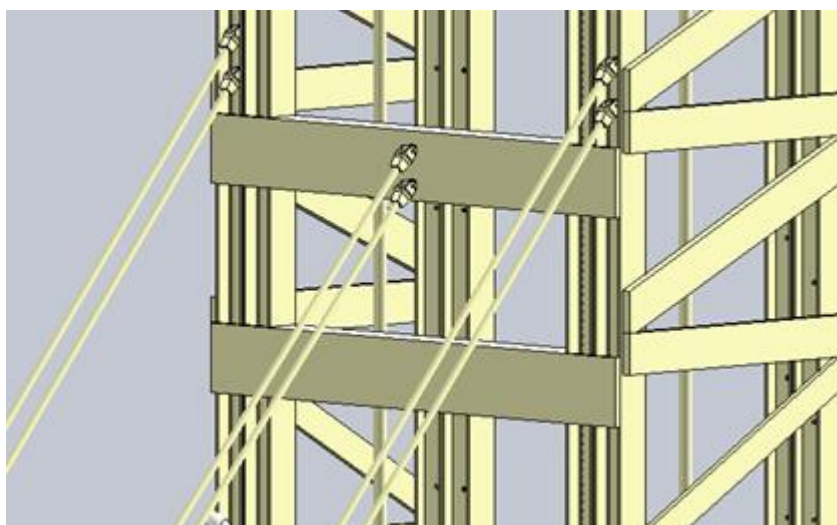


Figura 53. Estrutura do elevador e os tirantes.

A estrutura é ainda constituída por duas plataformas (Figura 54) para os operadores e colocação de componentes e ferramentas necessária nos dois níveis onde se realizam as operações de manutenção (ver 3.2.2 *Procedimento de Manutenção*).

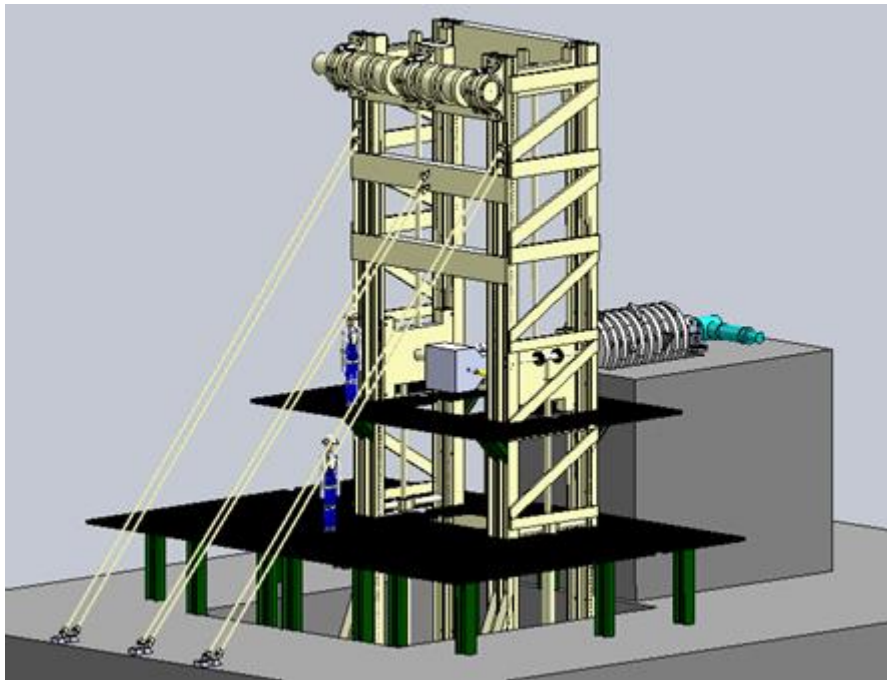


Figura 54. Estrutura com as duas plataformas.

A plataforma superior tem uma dimensão de cerca de 5m de largura e 10 m de comprimento, sendo apenas utilizada para a substituição dos martelos dos níveis superiores do rotor. A plataforma inferior é de dimensão superior, com 7 m de largura e 10 m de comprimento, e serve de espaço de trabalho ao nível da manutenção do rotor, com área suficiente para colocar componentes e outras ferramentas necessárias, facilitando assim todo o processo. Ambas as plataformas são compostas por gradis de aço de 500mm x 1000 mm e perfis de aço, como se pode ver na Figura 55. (Cobermaster, 2014)

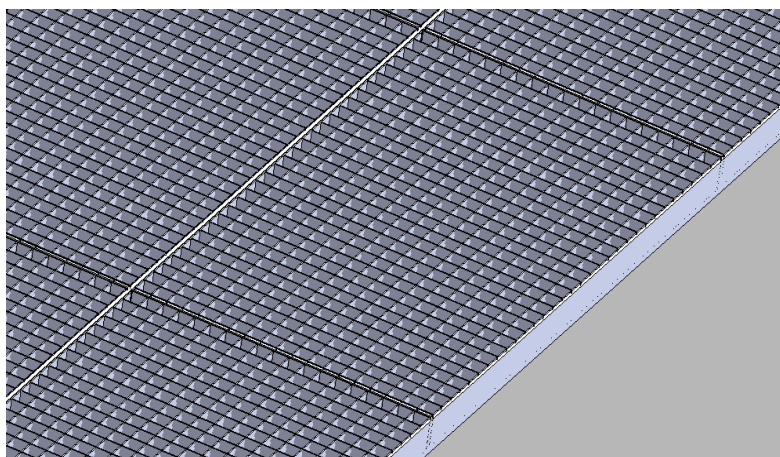


Figura 55. Gradis.

3.4.1.2 Cilindros hidráulicos

Os dois cilindros hidráulicos necessários para vencer a força para movimentar o elevador foram dimensionados tendo em conta o facto de se tratar de um elevador telescópico, ou seja, para vencerem o dobro da força das partes em movimento. Estes cilindros são de simples efeito uma vez que o elevador possui uma massa própria das partes em movimento que assegura o movimento gravítico descendente.

Para a seleção dos cilindros hidráulicos seguiram-se os passos apresentados na Tabela 2, considerando a massa uniformemente distribuída. A capacidade de força necessária que cada cilindro tem de suportar, apresentada na Tabela 1, foi calculada através das expressões (1) e (2).

$$m_{\text{máx.elevador}} = 2 \times (m_{\text{rotor}} + m_{\text{travessão}} + m_{\text{corrediças}} + m_{\text{mesa}}) \quad (1)$$

$$F_{\text{cilindro}} = \frac{m_{\text{máx.elevador}} * g}{2} \quad (2)$$

Tabela 2. Parâmetros de seleção dos cilindros de hidráulicos de elevação.

		Fórmulas utilizadas
Dados de entrada	$F_{\text{cilindro}} = 400 \text{ kN}$ $p = 200 \text{ bar}$	
Parâmetros de seleção	$\varnothing_{\text{êmbolo}} \approx 160 \text{ mm}$	$F = p \times A$
Caraterísticas selecionadas	$\varnothing_{\text{êmbolo}} = 200 \text{ mm}$ $L = 3\,000 \text{ mm}$	

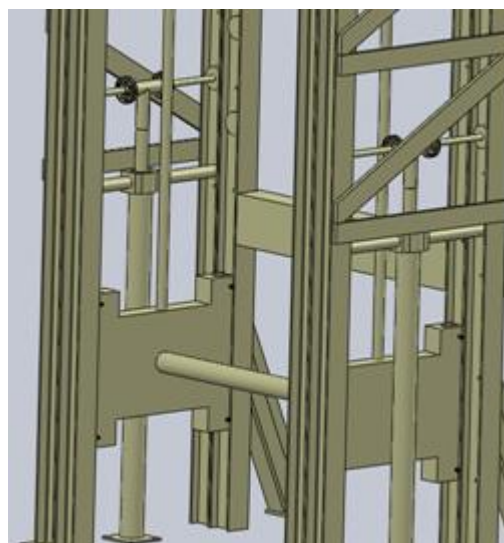


Figura 56. Cilindros hidráulicos.

3.4.1.3 Cabos de elevação

O elevador telescópico, como já foi referido anteriormente, possui um sistema de cabos e roldanas aliado ao cilindro hidráulico. O dimensionamento dos cabos de aço seguiu os passos descritos na Tabela 3. Considerou-se que a força necessária é uniformemente distribuída pelos dois cabos, em cada cilindro ($k_{\text{distribuição}} = 0,5$).

Tabela 3. Parâmetros de seleção dos cabos de aço

		Fórmulas utilizadas
Dados de entrada	$F \approx 400 \text{ kN}$ $K_{\text{distribuição}}^1 = 0,5$	
Parâmetros de seleção	$F_{\text{cabo}} = 200 \text{ kN}$	$F_{\text{cabo}} = F_{\text{máx}} \times K_{\text{distribuição}}$
Características selecionadas	Tipo: HD 8Kx26 $\varnothing_{\text{cabo}} = 15 \text{ mm}$ $F_{\text{min rotura}} = 237 \text{ kN}$ (Oliveira e Sá, 2014)	$F_{\text{min rotura}} > 200 \text{ kN}$

3.4.1.4 Guiamentos

As duas corrediças existentes no elevador, corrediça inferior e superior, foram construídas para que o guiamento do rotor ao longo do elevador ocorresse em perfeitas condições.

A corrediça inferior (Figura 57) trata-se de uma peça que desliza entre duas colunas através de oito rodas, duas em cada extremo da mesa com orientações distintas: paralelas e perpendiculares à superfície de guiamento. (Figura 58). A existência destas duas orientações ajuda na diminuição dos esforços aplicados à estrutura do elevador, resultantes dos esforços aplicados na corrediça, sobretudo na orientação perpendicular ao guiamento. O conjunto das duas corrediças inferiores é o suporte para o veio que alberga a mesa do rotor (Figura 59). Este veio possibilita uma ligação rígida entre as duas corrediças auxiliando na sincronização dos movimentos.

¹ $K_{\text{distribuição}}$: Coeficiente de distribuição da força.

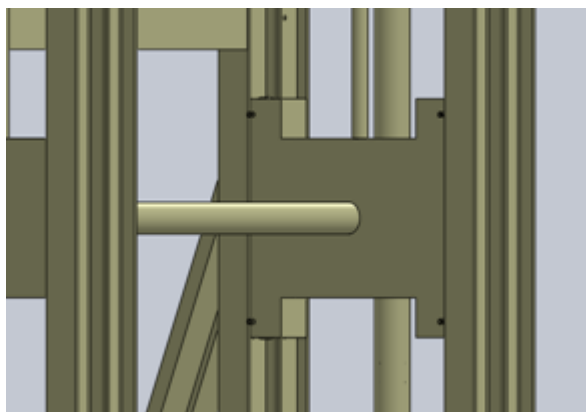


Figura 57. Corrediça inferior do elevador.

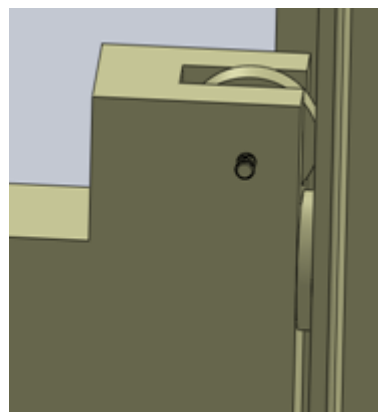


Figura 58. Vista em detalhe da orientação das rodas.

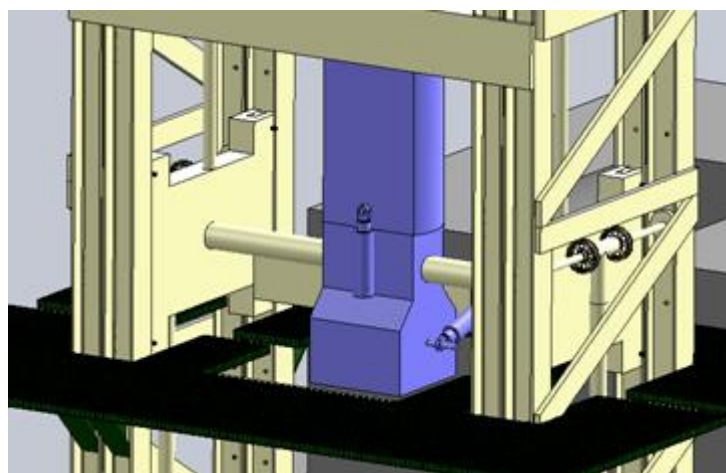


Figura 59. Corrediças inferiores do elevador.

O guiamento superior (Figura 60) é semelhante à estrutura do guiamento inferior, possuindo igualmente oito rodas, duas em cada extremo com as mesmas orientações, já referidas. Este guiamento tem na sua estrutura um batente para o travessão (a sua funcionalidade foi explicada no capítulo 3.2.1 *Movimentação do rotor*) e uma geometria que permite o encaixe do travessão, assegurando assim o seu guiamento (Figura 61).

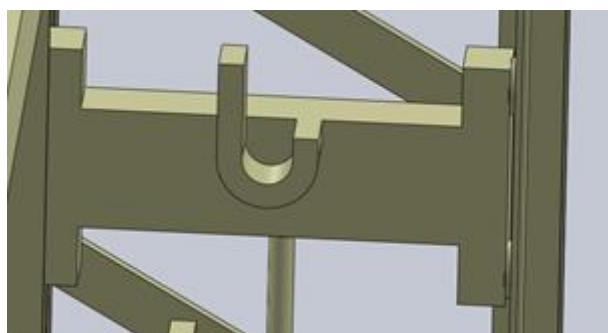


Figura 60. Corrediça superior.

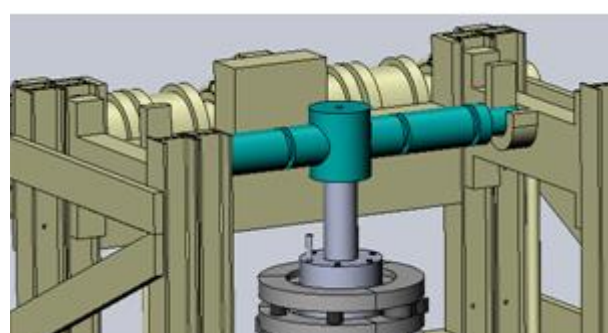


Figura 61. Corrediças superiores.

No momento em que o rotor atinge a posição vertical, independentemente da posição no elevador (mais no topo ou mais na base), o batente da corrediça superior tem de se encontrar na mesma posição que o travessão do rotor para este ir ao seu encontro. De

forma a garantir, a todo o momento, a posição correta da corrediça superior, as duas corrediças (superior e inferior) encontram-se rigidamente ligadas mantendo sempre a mesma distância entre as duas. (Figura 62)

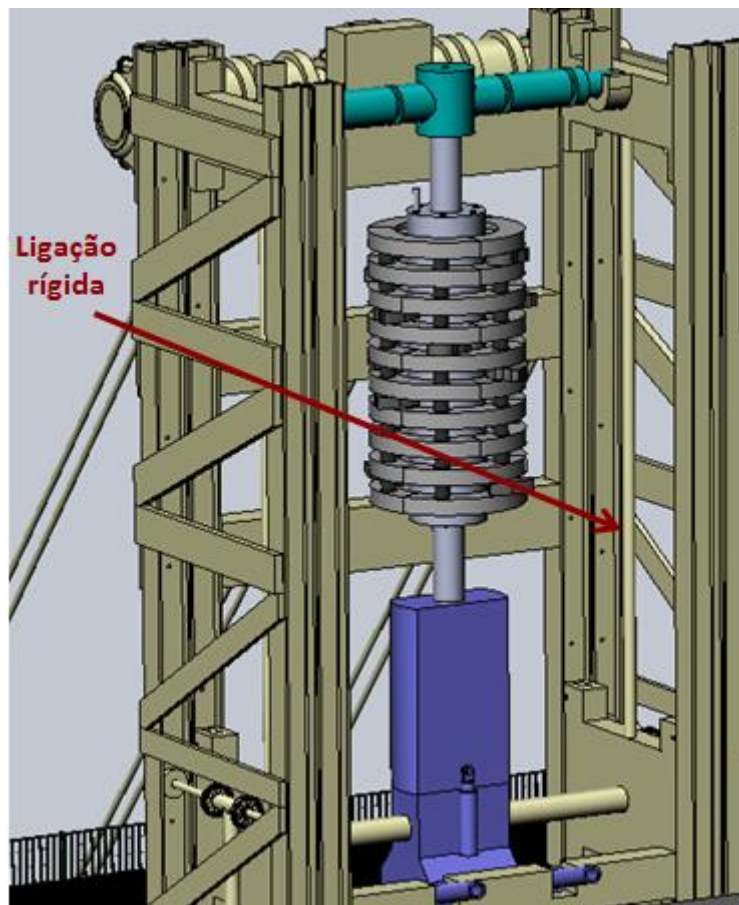


Figura 62. Corrediça superior e inferior com ligação rígida.

3.4.2 Extremidades do rotor

A movimentação do rotor através desta solução necessita de dois elementos, um em cada extremidade do rotor, para se conseguir a ligação entre o rotor e o sistema de movimentação. (Figura 63 e Figura 64)

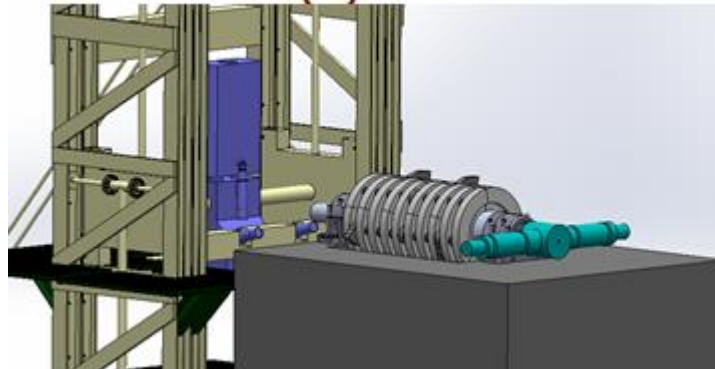


Figura 63. Rotor na posição de funcionamento

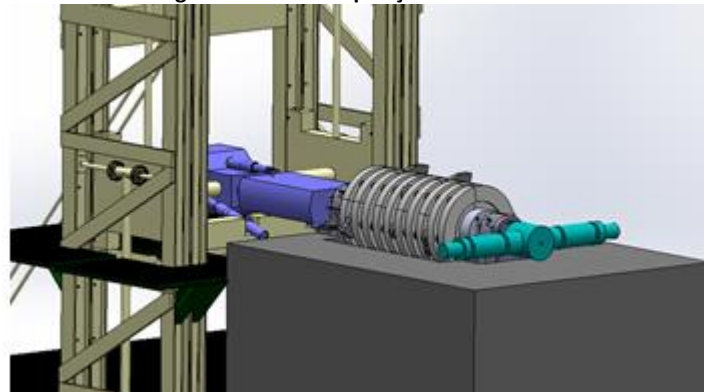


Figura 64. Rotor com as peças das extremidades colocadas

O elemento do extremo esquerdo do rotor na Figura 64 (cor azul), já anteriormente referido como a mesa do elevador, está associado às corrediças inferiores e permite a ligação entre o rotor e o elevador. A sua estrutura apresenta-se na Figura 65. É constituído por duas partes (1) e (2), que se encontram ligadas através de dois cilindros hidráulicos (3), e por mais dois outros cilindros hidráulicos (4) ligados rigidamente à estrutura do elevador. A mesa do elevador possui ainda um contrapeso de forma a auxiliar o movimento de rotação do rotor realizado pelo guincho.

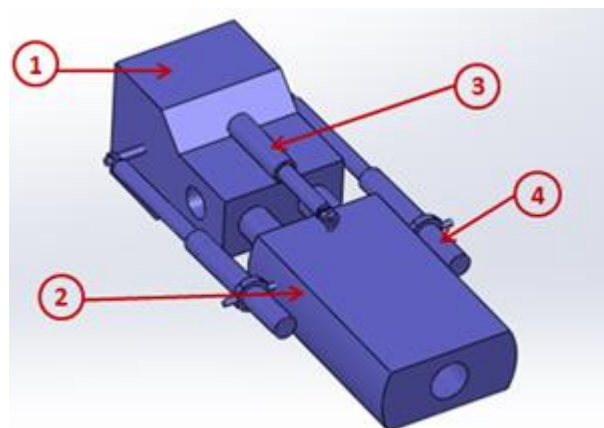


Figura 65. Mesa do elevador

Os cilindros hidráulicos (3) fazem o avanço do tubo de acoplamento entre a mesa e o rotor, com um deslocamento máximo de 200 mm. Este avanço é necessário para o encaixe do travessão no guiamento e a colocação ou libertação da mesa do rotor. (Figura 66)

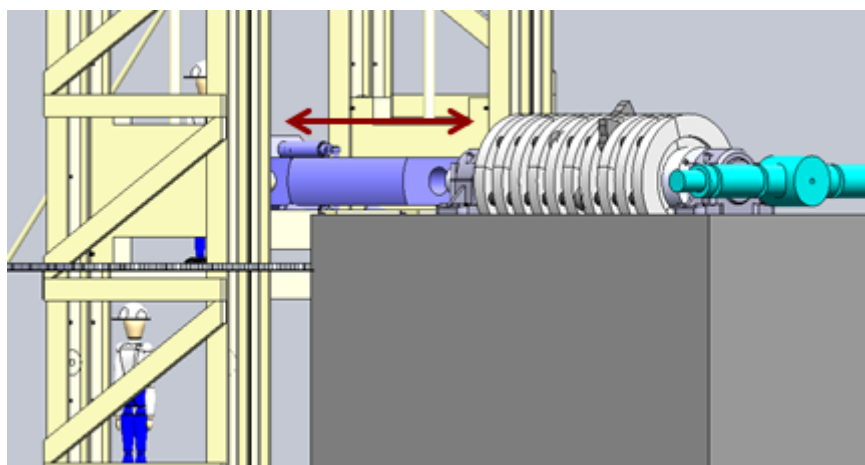


Figura 66. Movimento horizontal de recuo do tubo de acoplamento do rotor.

Os passos seguidos para o seu dimensionamento encontram-se apresentados na Tabela 4 e a massa suportada por cada cilindro foi calculada segundo a expressão (3):

$$m_{máx.cilindro} = m_{rotor} + m_{travessão} \quad (3)$$

Tabela 4. Parâmetros de seleção dos cilindros de hidráulicos da mesa do rotor.

		Fórmulas utilizadas
Dados de entrada	$F \approx 185 \text{ kN}$ $p = 200 \text{ bar}$	
Parâmetros de seleção	$\varnothing_{\text{êmbolo}} \approx 109 \text{ mm}$	$F = p \times A$
Caraterísticas selecionadas	$\varnothing_{\text{êmbolo}} \approx 125 \text{ mm}$ $L = 200 \text{ mm}$	

Os cilindros hidráulicos (4), que se encontram nas laterais da mesa, são de auxílio à articulação comandam os últimos graus do movimento para a posição vertical, que correspondem ao momento em que o guincho deixa de conseguir fazer força, bem como os primeiros 10° no movimento de retorno do rotor para a máquina, auxiliando ainda o resto do movimento, como foi explicado em detalhe no capítulo 3.2.1 *Movimentação do rotor*. Para o dimensionamento destes cilindros primeiro calculou-se a força máxima necessária (Figura 67), usando os 10° como referência do momento em que o guincho deixa de conseguir comandar o movimento, e posteriormente seguiram-se os passos apresentados na Tabela 5. para o dimensionamento de cada um dos cilindros.

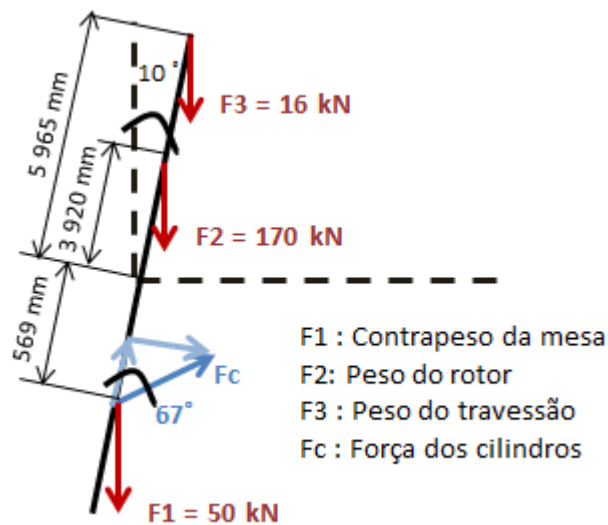


Figura 67. Esquema representativo das forças presentes quando o rotor se encontra a 80°.

Neste movimento final realizado pelos cilindros hidráulicos, estes encontram-se a realizar o movimento de recuo da haste, ou seja, é a câmara secundária que está ligada à linha P exercendo assim a força necessária para deslocar o rotor para a posição vertical.

Tabela 5. Parâmetros de seleção dos cilindros de hidráulicos de auxílio à articulação.

		Fórmulas utilizadas
Dados de entrada	$F_{\text{máx.}} = 150 \text{ kN}$ $p = 200 \text{ bar}$ $\phi_{\text{haste}} = 70 \text{ mm}$	$A_2 = \frac{F_{\text{máx}}}{p_{\text{máx}}}$
Parâmetros de seleção	$\phi_{\text{êmbolo}} \approx 120,205 \text{ mm}$	$A_2 = \frac{\pi}{4} \times (\phi_{\text{êmbolo}}^2 - \phi_{\text{haste}}^2)$
Caraterísticas selecionadas	$\phi_{\text{êmbolo}} \approx 125 \text{ mm}$ $L = 900 \text{ mm}$	

O travessão de apoio superior do rotor na Figura 64 (cor azul-esverdeado), permite a ligação entre o rotor e o sistema de cabos - ver Figura 68. É composta por uma única parte apresentando ranhuras onde são acomodados os cabos ligados ao tambor que vão permitir a rotação do rotor.

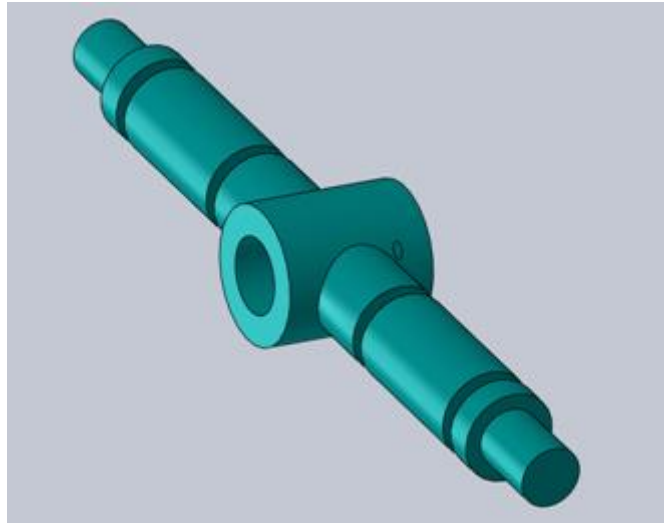


Figura 68. Travessão de apoio superior do rotor.

3.4.3 Sistema guincho e cabos

A movimentação do rotor para a vertical através da rotação do mesmo é conseguida pela existência de um guincho dotado de um tambor duplo e cabos (Figura 69). Este sistema é composto por quatro cabos, ligados ao rotor no seu extremo mais afastado do elevador, e a cada cabo corresponde um tambor que vai enrolar ou desenrolar o cabo a uma determinada velocidade. Figura 69

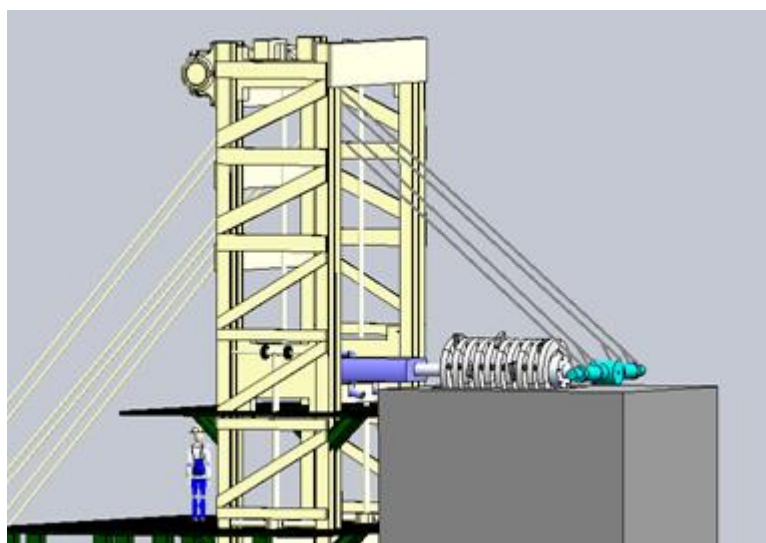


Figura 69. Guincho

Apenas dois cabos seriam necessários para a rotação do rotor mas, por razões de segurança, ou seja, de forma a garantir que na movimentação do rotor para o exterior da máquina o rotor não cai caso um dos cabos entre em rutura, foram acrescentados mais dois cabos (redundância).

Para o dimensionamento dos cabos de aço foi necessário calcular a força que o cabo exerce nas condições de máxima solicitação (Figura 70).

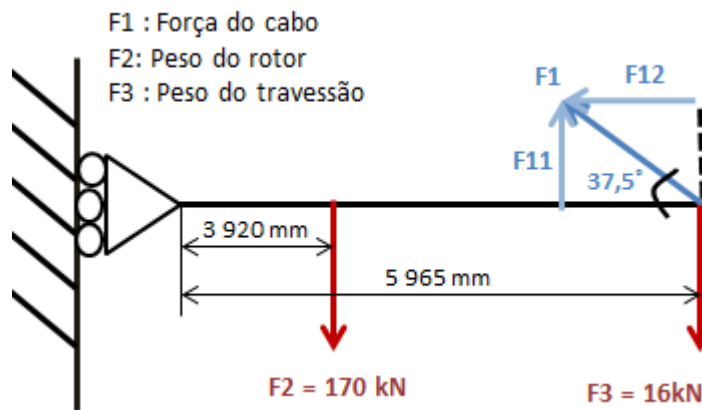


Figura 70. Esquema representativo das forças aplicadas.

Os passos para o dimensionamento encontram-se apresentados na Tabela 6. Este dimensionamento foi calculado para o sistema considerando apenas dois cabos (situação de máxima solicitação).

Tabela 6. Parâmetros de seleção dos cabos de aço

Dados de entrada	K distribuição = 0,5 F _{Max} = 220 kN	Fórmulas utilizadas
Parâmetros de seleção	F _{cabo} = 110 kN	F _{cabo} = F _{max} * K distribuição
Caraterísticas selecionadas	Tipo: HD 24xK7 Ø _{cabo} = 13 mm F _{min rotura} = 150 kN (Oliveira e Sá, 2014)	F _{min rotura} > 110 kN

Os tambores (Figura 71) encontram-se fixos na estrutura do elevador e decidiu-se construir cada tambor a partir de maquinaria de um tubo mecânico soldado em duas flanges, uma em cada extremo.

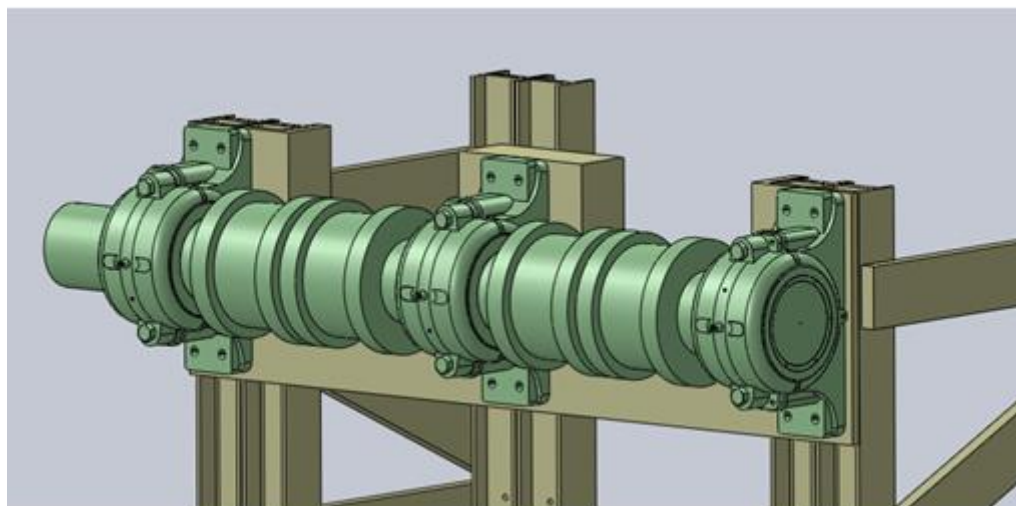


Figura 71. Tambores.

O seu dimensionamento apresenta-se na Tabela 6 e foi realizado tendo em conta o tipo de cabo e diâmetro. A razão de diâmetro tambor cabo ($R_{\phi_{\text{tambor}}/\phi_{\text{cabo}}}$) foi escolhida tendo em conta que a $R_{\phi_{\text{tambor}}/\phi_{\text{cabo}}}$ mínima é 27. (Oliveira e Sá, 2014)

Tabela 7. Parâmetros de seleção do diâmetro do tambor.

		Fórmulas utilizadas
Dados de entrada	$R_{\phi_{\text{tambor}}/\phi_{\text{cabo}}} = 27$ $\phi_{\text{cabo}} = 13\text{mm}$	
Parâmetros de seleção	$\phi_{\text{tambor}} = 350,5\text{ mm}$	$\phi_{\text{tambor}} = R \times \phi_{\text{cabo}}$
Caraterísticas selecionadas	DIN 2448 20 Mn V6 $\phi_{\text{exterior tambor}} = 355,6\text{ mm}$ Espessura = 36 mm (Pinhol)	

Para calcular o comprimento do tambor seguiram-se os passos descritos na Tabela 8.

Tabela 8. Parâmetros de seleção do comprimento do tambor.

		Fórmulas utilizadas
Dados de entrada	$h = 9500 \text{ mm}$ $n_{\text{voltas livres}}^2 = 2 \text{ p/cabo}$ $n_{\text{voltas fixas}}^3 = 2 \text{ p/cabo}$	$n_{\text{voltas enrolar}}^4 = h / (\pi \times \phi_{\text{tambor}})$ $n_{\text{voltas enrolar}} = 8,6 \approx 9$
Parâmetros de seleção	$L_{\text{tambor}} = 218,805 \text{ mm}$	$L_{\text{tambor}} = n_{\text{voltas livres}} + n_{\text{voltas fixas}} + n_{\text{voltas enrolar}}$
Caraterísticas selecionadas	$L_{\text{tambor}} = 300 \text{ mm}$	

Para o veio do tambor o material escolhido foi o Aço ao Carbono St52 (F. Ramada, 2012) e o seu dimensionamento encontra-se apresentado na Tabela 9.

Tabela 9. Parâmetros de seleção do veio do tambor.

		Fórmulas utilizadas
Dados de entrada	$\sigma_{\text{Rotura}}^5 = 500 \text{ MPa}$ $\tau_{\text{Azul}}^6 = 15,5 \text{ MPa}$ $G^7 = 75,8 \text{ GPa}$ $\theta_{\text{adm}}^8 = 0,25^\circ/\text{m}$ $F_{\text{elevação}} = 216,784 \text{ kN}$ $\phi_{\text{tambor}} = 350,5 \text{ mm (após maquinagem)}$	$T_{\text{tambor}} = F_{\text{elevação}} \times \frac{\phi_{\text{tambor}}}{2}$ $T_{\text{tambor}} = 37991,46 \text{ Nm}$
Parâmetros de seleção	$d'_T = 242,9 \text{ mm}$ $d'_R = 67,22 \text{ mm}$	Torção: $d'_T = \sqrt[3]{\frac{16 \times T_{\text{tambor}}}{\pi \times \tau_{\text{azul}}}}$ Rigidez: $d'_R = \sqrt[3]{\frac{32 \times T_{\text{tambor}}}{\pi \times G \times \theta_{\text{adm}}}}$
Caraterísticas selecionadas	$d = 250 \text{ mm}$	$d'_T > 229,661 \text{ mm}$

² n voltas livres = número de voltas necessárias no tambor sem cabo enrolado;

³ n voltas fixas = número de voltas necessárias no tambor com cabo permanentemente enrolado;

⁴ n voltas enrolar = número de voltas necessárias enrolar no tambor para cumprir a o movimento;

⁵ Tensão de rotura;

⁶ Resistência de pré-dimensionamento à torção;

⁷ Módulo de rigidez de um material;

⁸ Critério de rigidez;

O binário necessário no tambor vai ser menor do que o valor indicado na Tabela 9 uma vez que os cilindros hidráulicos de auxílio à articulação e o contrapeso da mesa do elevador vão ajudar a criar binário diminuindo assim o esforço por parte do guincho.

3.4.4 Cilindros hidráulicos da operação de manutenção

Os três cilindros hidráulicos necessários para o processo de substituição dos martelos têm de ser compactos para que sejam de fácil colocação e transporte pelo operador. Na Tabela 10 encontram-se os passos dados para a seleção de cada um dos cilindros.

Tabela 10. Parâmetros de seleção dos cilindros de manutenção.

Dados de entrada	$F_{m\acute{a}x} \approx 55,59 \text{ kN}$ $p = 500 \text{ bar}$ $n_{\text{cilindros}} = 3$	Fórmulas utilizadas
		$F = F_{m\acute{a}x} / n_{\text{cilindros}}$
Parâmetros de seleção	$\varnothing_{\text{êmbolo}} \approx 37,52 \text{ mm}$	$F = p \times A$
Caraterísticas selecionadas	$\varnothing_{\text{êmbolo}} \approx 40 \text{ mm}$ $L = 200 \text{ mm}$	

Estes cilindros devido às caraterísticas já enunciadas não necessitam de uma central hidráulica para o seu acionamento, podendo ser acionados de forma manual pelos operadores, por exemplo através de uma bomba movida por pedal, tal como acontece com os porta-paletes.

3.5 Análise estrutural

Uma vez que a estrutura e alguns componentes em particular estão sujeitos a grandes esforços provocados pelo rotor, foi necessário fazer uma análise estrutural aos principais elementos sujeitos a tais esforços no sentido de compreender se a estrutura tem capacidade de aguentar esses esforços. Foram realizadas três análises estruturais, uma ao veio que alberga a mesa do elevador, e duas análises estruturais à estrutura do elevador, uma sem carga, quando esta se encontra em repouso, e outra com carga.

O *software* utilizado para a análise estrutural foi o *Abaqus/CAE 6.12-3*, que permite fazer uma análise através do Método dos Elementos Finitos.

3.5.1 Análise à estrutura principal do elevador sem carga

O elemento pertencente a toda estrutura do elevador que foi submetido à análise foi apenas a parte que dá corpo ao elevador, ou seja, os perfis e as travessas, tal como se pode ver na Figura 72.

Esta análise à estrutura sem carga foi realizada com o intuito de se perceber se o pré-tensionamento dos tirantes provoca deslocamentos na estrutura e se estes são de um valor aceitável.

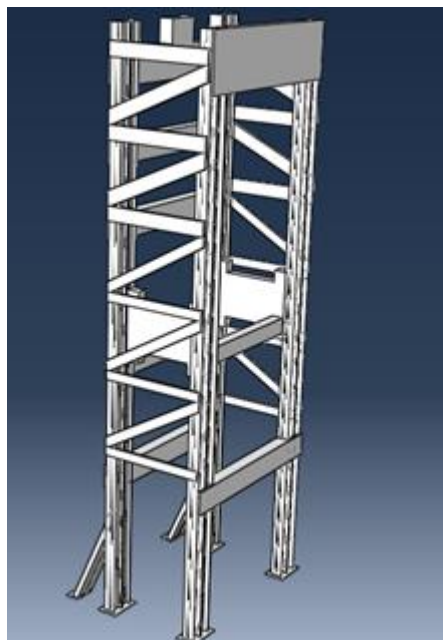


Figura 72. Parte da estrutura do elevador submetido a análise.

3.5.1.1 *Propriedades mecânicas*

O material utilizado para os elementos da estrutura têm as suas propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11. Propriedades mecânicas do material dos elementos. (Granta Design Limited, 2012)

<i>Módulo de Elasticidade, E</i>	180 GPa
<i>Coefficiente de Poisson, ν</i>	0,3

3.5.1.2 *Condições de fronteira e cargas aplicadas*

As condições de fronteiras utilizadas foram apenas o encastramento na base de cada coluna da estrutura do elevador e nas suas quatro sapatas, como representado na Figura 73.

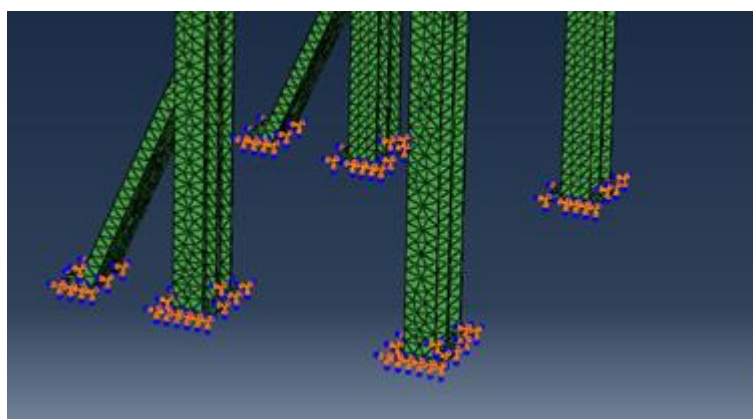


Figura 73. Representação do encastramento na estrutura.

Foi aplicada uma única carga correspondente ao pré-esforço dos tirantes:

- *Esforço dos tirantes na estrutura* – este esforço corresponde ao pré-tensionamento dado aos tirantes, a força está decomposta numa componente horizontal e outra vertical (ver Figura 74);

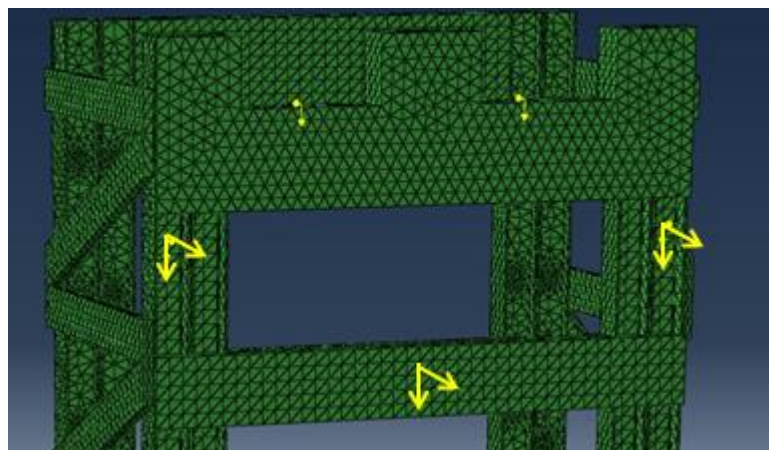
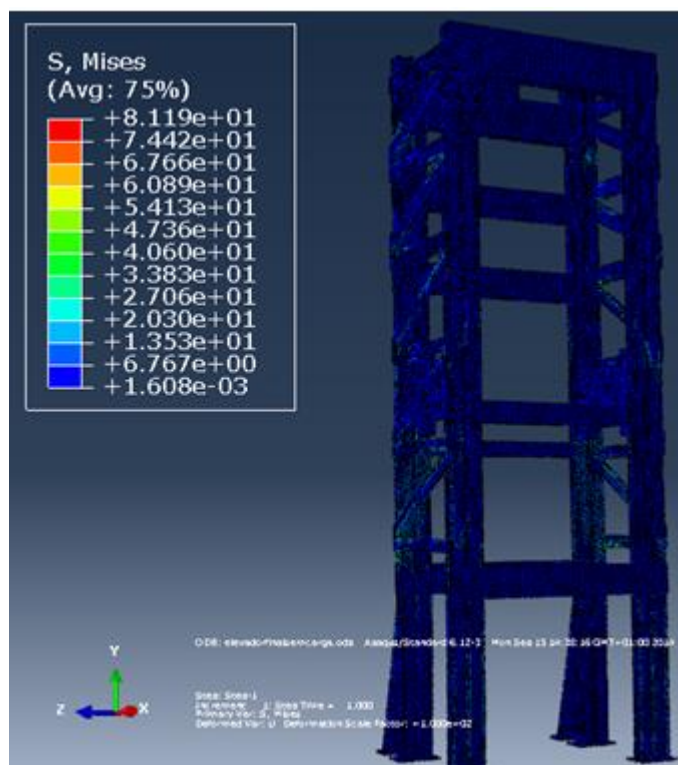


Figura 74. Representação da carga aplicada do tirante.

3.5.1.1 Resultados e análise

O pré-tensionamento de cada tirante tem um valor de 70 kN de componente horizontal e 80 kN de componente vertical, totalizando uma força de 100 kN por tirante. Uma vez que esta simulação foi realizada com três tirantes, totaliza um esforço na estrutura de 300 kN.

A distribuição de tensões obtida na estrutura pode ser observada na Figura 75 e a representação dos deslocamentos na Figura 76. Todas as figuras encontram-se com a representação dos deslocamentos numa escala de 100:1.



A análise da distribuição de tensões permite concluir que a tensão máxima que a estrutura vai estar sujeita é de 81,19 MPa, sendo bastante inferior à tensão de limite elástico do ferro (210 MPa), ou seja, a estrutura nunca se vai deformar plasticamente.

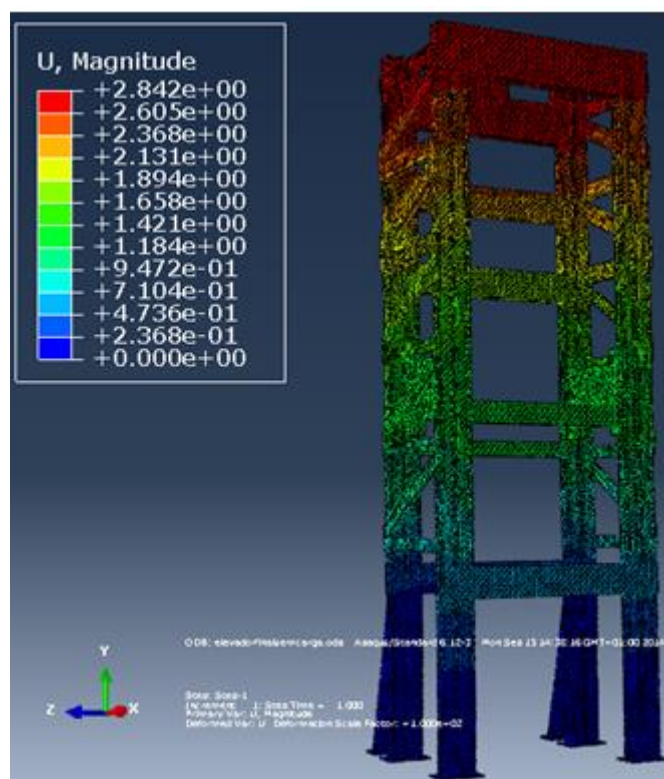


Figura 76. Representação dos deslocamentos obtidos na estrutura.

A análise à representação dos deslocamentos na estrutura permite identificar um aumento gradual dos deslocamentos ao longo da estrutura, atingindo um máximo de 2,84 mm na zona mais propícia a fenómenos de flexão e onde se encontram fixos os tirantes. Uma vez que toda a estrutura possui 12 000 mm de altura e 4 000 mm de comprimento e que se trata do caso sem carga, em que apenas o pré-tensionamento dos tirantes está a provocar o desvio da estrutura os deslocamentos presentes são pouco significativos e por isso admissíveis neste contexto.

3.5.2 Análise à estrutura principal do elevador com carga

O elemento em análise é o mesmo da análise anterior, que se encontra na Figura 72. Com esta simulação pretende-se perceber se a estrutura, agora com carga, sofre algum tipo de deformação e em que partes.

3.5.2.1 Propriedades mecânicas

O material utilizado para os elementos da estrutura têm as suas propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 11.

3.5.2.2 Condições de fronteira e cargas aplicadas

As condições de fronteiras utilizadas foram apenas o encastramento na base de cada coluna da estrutura do elevador e nas suas quatro sapatas, como representado na Figura 77.

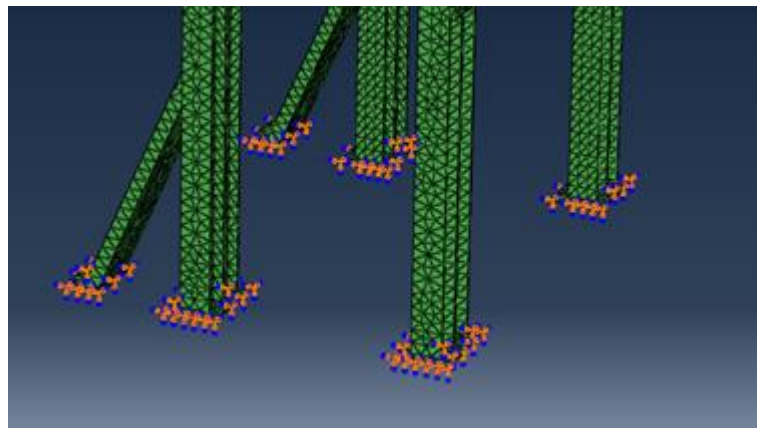


Figura 77. Representação do encastramento na estrutura.

As cargas aplicadas na estrutura foram quatro:

- *Força horizontal provocada pelo rotor no instante inicial de rotação* – corresponde à solicitação máxima que a estrutura do elevador vai sofrer (representada pelas setas amarelas na Figura 78);

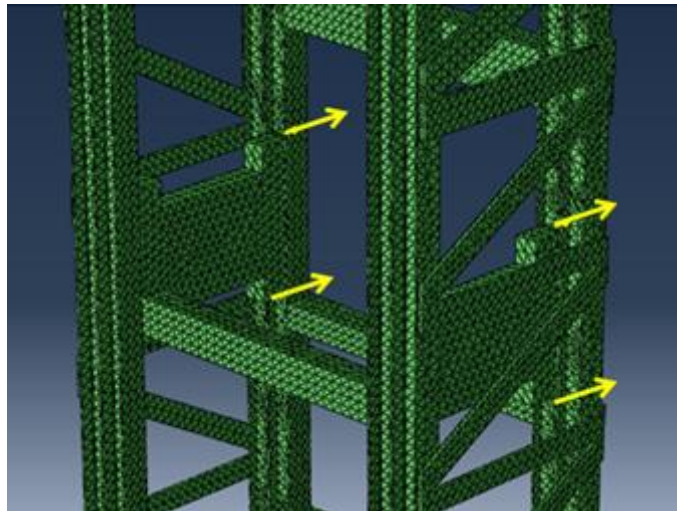


Figura 78. Representação da carga horizontal aplicada.

- *Esforço dos tirantes no lado oposto da estrutura* – estes elementos ajudam a compensar os esforços da primeira carga; a força está decomposta numa componente horizontal e outra vertical (ver Figura 79);

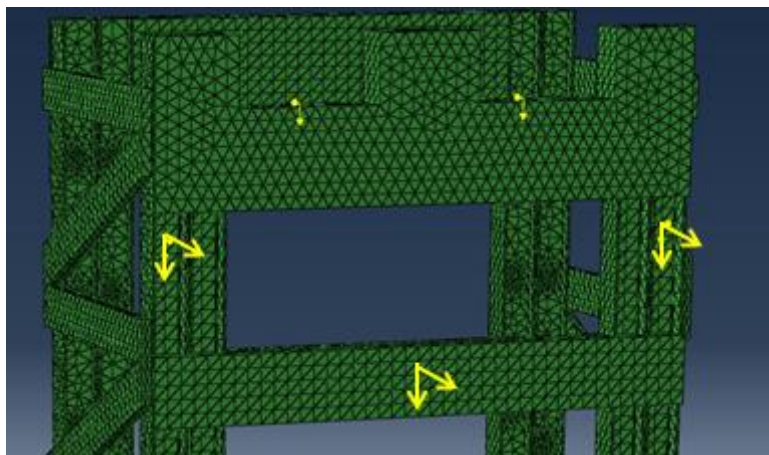


Figura 79. Representação da carga aplicada do tirante.

- *Esforço provocado pelos cabos* – corresponde ao esforço provocado pelos cabos no guincho e que é transmitido à estrutura do elevador, decomposta numa força horizontal e noutra vertical (ver Figura 80)

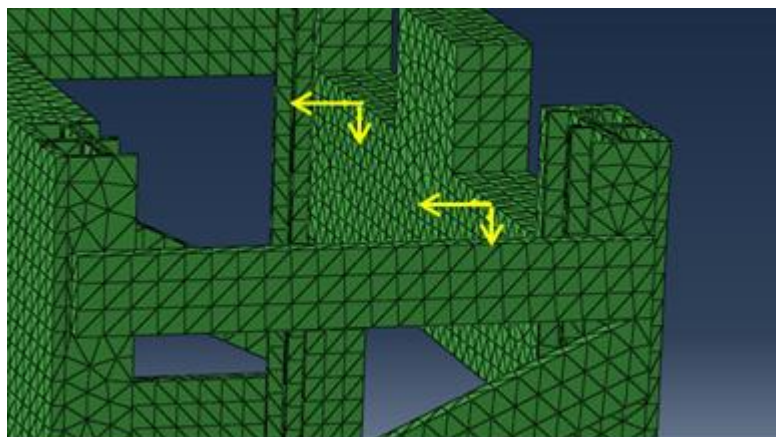


Figura 80. Representação do esforço provocado pelos cabos.

- *Esforço provocado pelos cilindros de auxílio à articulação* – corresponde ao esforço máximo transmitido pelos cilindros hidráulicos ao munhão e consequentemente à estrutura. (ver Figura 81)

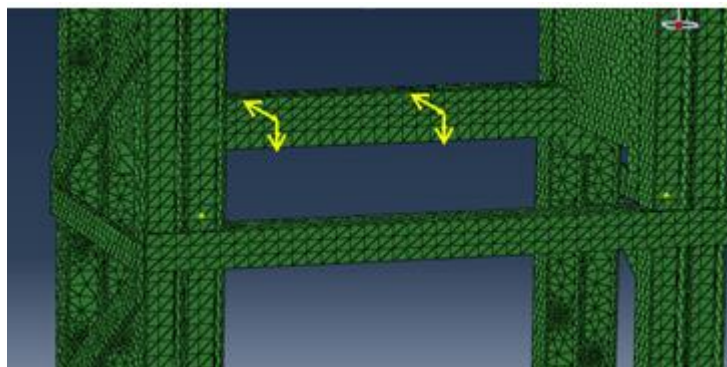


Figura 81. Representação do esforço provocado pelos cilindros hidráulicos.

3.5.2.3 Resultados e análise

As quatro cargas horizontais aplicadas na estrutura do elevador têm amplitude de 60 kN totalizando assim 240 kN de carga total, carga esta que é um majorante do valor real máximo da carga ($F = 216$ kN). As cargas relativas aos cilindros têm uma amplitude de 230 kN na componente horizontal e 55 kN na componente vertical totalizando a carga total de 430 kN e 130 kN respetivamente, majorantes da carga real. Quanto à carga correspondente ao esforço do cabo, a sua componente horizontal total é de igual valor à carga total horizontal já referida, e a sua componente vertical é de 65 kN totalizando assim 130 kN de carga total, majorante da carga real, de cerca de 125 kN.

A distribuição de tensões obtidas na estrutura pode ser observada na Figura 82 e a representação dos deslocamentos na Figura 83 e Figura 84. Todas as figuras encontram-se com a representação dos deslocamentos numa escala de 100:1.

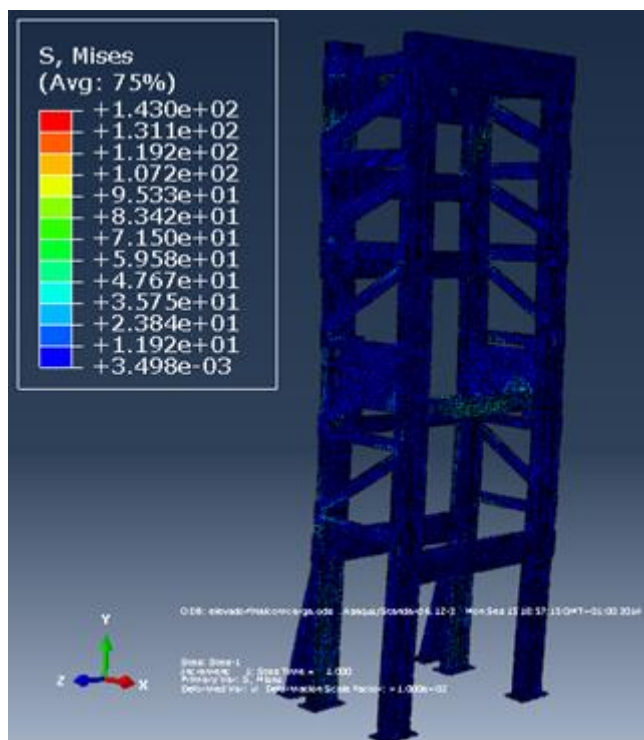


Figura 82. Distribuição das tensões na estrutura.

A análise da distribuição de tensões permite concluir que a tensão máxima a que a estrutura vai estar sujeita é de 143 MPa, sendo bastante inferior à tensão de limite elástico do ferro (210 MPa), ou seja, a estrutura nunca se vai deformar plasticamente.

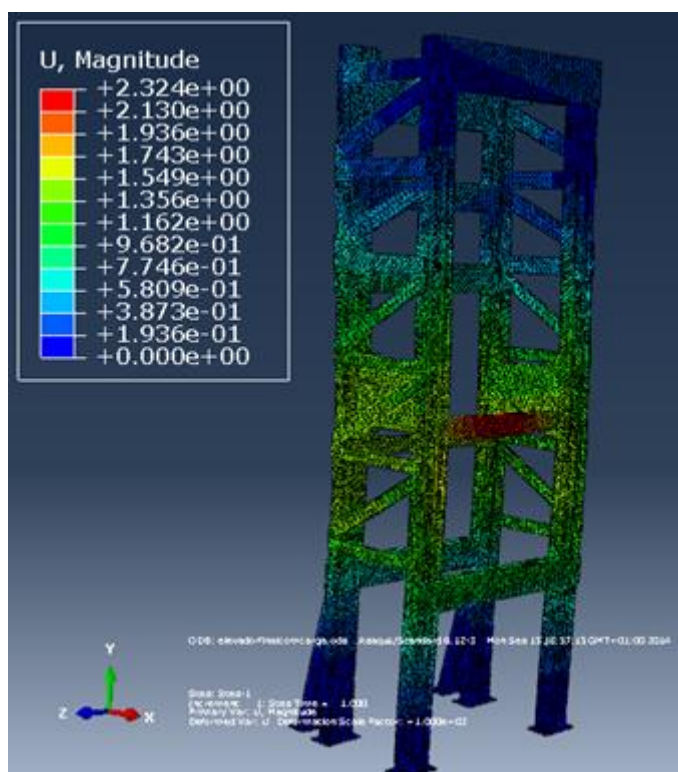


Figura 83. Representação dos deslocamentos obtidos na estrutura.

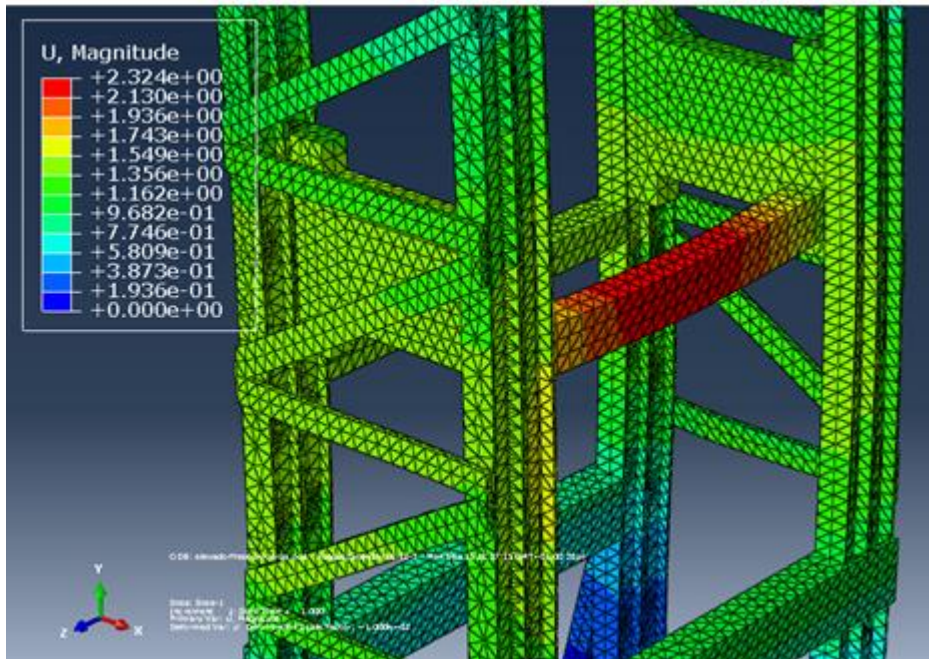


Figura 84. Vista em pormenor dos pontos que sofreram maior deslocamento.

A análise à representação dos deslocamentos na estrutura permite concluir que quando o elevador se encontra com carga, essa carga provoca um deslocamento no sentido oposto e de mesmo valor que o deslocamento que o elevador possui sem carga, fazendo com que a estrutura deixe de estar deformada.

Os resultados da simulação permitem, também, identificar uma zona onde os deslocamentos são superiores, com um deslocamento máximo de 2,32 mm. Esta zona corresponde à travessa que suporta os cilindros hidráulicos, que poderá ser reforçada de forma a diminuir este deslocamento. Uma vez que toda a estrutura possui 12 000 mm de altura e 4 000 mm de comprimento, os deslocamentos presentes na estrutura são pouco significativos e por isso admissíveis neste contexto.

3.5.3 *Análise à mesa do elevador*

A peça inferior do rotor, ou seja, a peça que faz a ligação entre o rotor e o elevador através de um veio, vai estar sujeita a grandes esforços provenientes, mais uma vez, do rotor no instante inicial de rotação. O veio de ligação, Figura 85, tem de ser capaz de suportar todo esse esforço e por isso foi também alvo de uma análise estrutural.

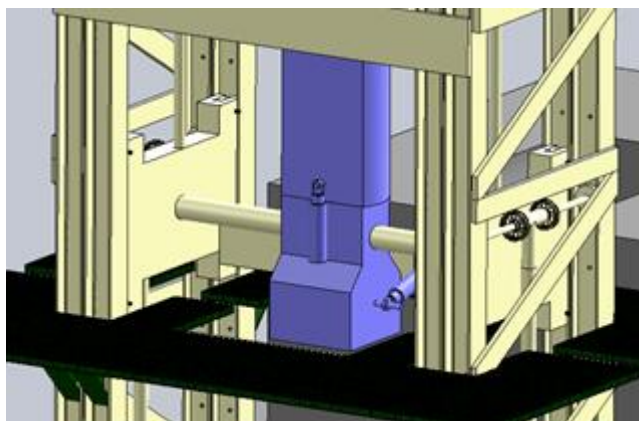


Figura 85. Peça inferior do rotor e o veio que faz a ligação com o elevador.

3.5.3.1 *Propriedades mecânicas*

O material utilizado para o elemento em análise tem as suas propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 11.

3.5.3.2 *Condições fronteira e cargas aplicadas*

As condições fronteira aplicadas foram encastramento nos dois extremos do veio, como representado na Figura 86, que são as zonas de fixação do veio ao elevador.

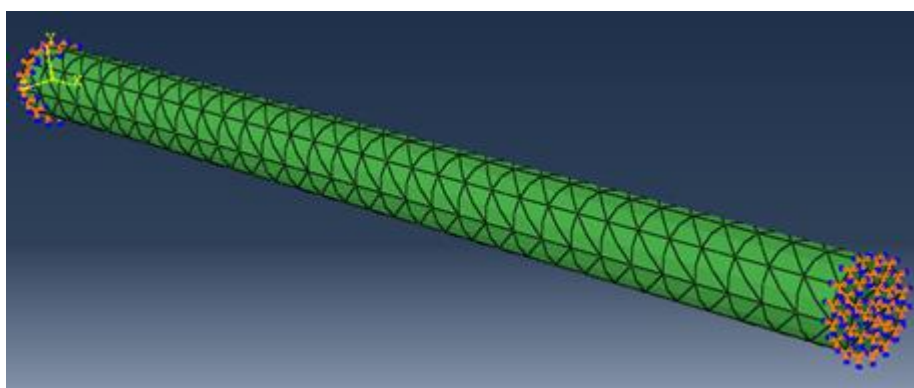


Figura 86. Representação do encastramento no veio.

Os esforços a que o veio é submetido são transmitidos por meio de dois rolamentos que estão colocados entre o veio e a peça do rotor. Assim foram colocadas duas cargas de igual amplitude na posição dos rolamentos, como se pode observar na Figura 87

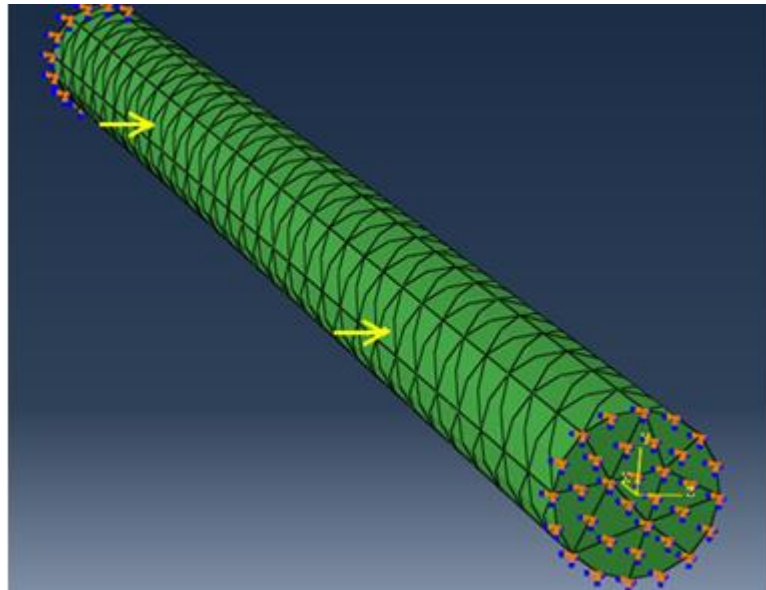


Figura 87. Representação das cargas aplicadas no veio.

3.5.3.3 Resultados e análise

Na simulação considerou-se a solicitação máxima que o rotor provoca no veio, que apenas tem componente horizontal com amplitude de 145,357 kN. Assim aplicaram-se as duas cargas com amplitude de 100 kN de forma a totalizar 200 kN de carga total, por majoração do valor real máximo da carga.

A Figura 88 apresenta a distribuição de tensões no veio e a Figura 89 apresenta os deslocamentos obtidos. Ambas as imagens encontram-se com a representação dos deslocamentos numa escala de 100:1.

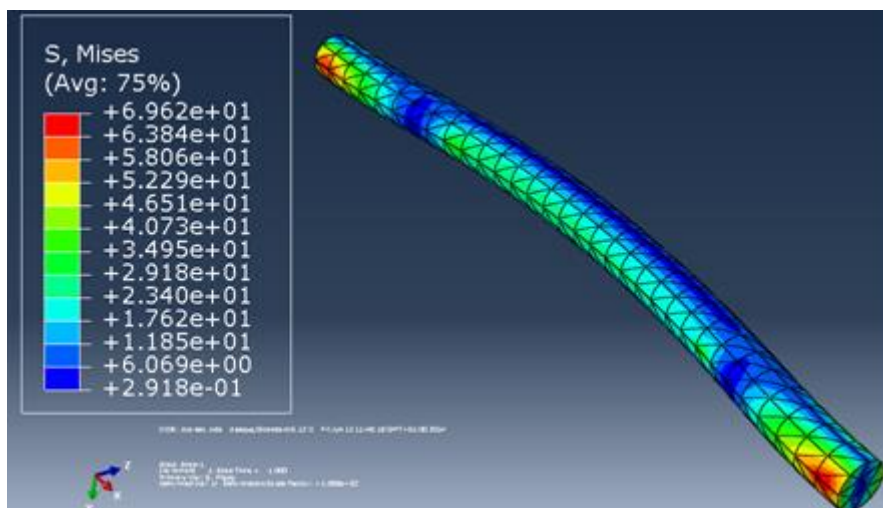


Figura 88. Distribuição das tensões no veio

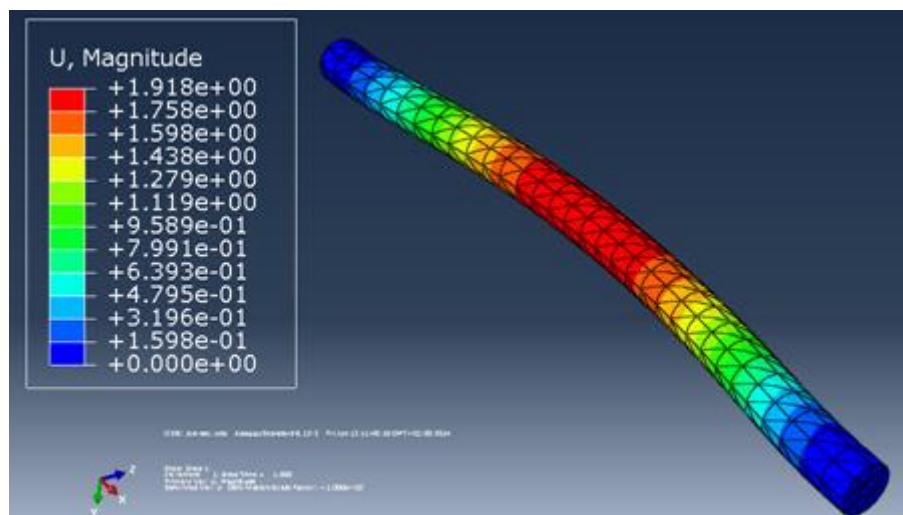


Figura 89. Deslocamentos obtidos no veio.

A análise da representação das tensões permite constatar que a tensão máxima a que o veio estará sujeito é de 69,62 MPa. Uma vez que a tensão de limite elástico de um aço é superior a 200 MPa pode-se concluir que o veio nunca entrará no regime plástico, ou seja, nunca sofrerá uma deformação permanente.

Na análise da representação dos deslocamentos verifica-se que o centro do veio é a parte que sofre maior deslocamento, atingindo um máximo de 1,92 mm, o que se pode concluir que se está perante um fenómeno de flexão. Contudo este deslocamento encontra-se no regime elástico e não é um valor crítico, uma vez que se está a tratar de peças com dimensões bastante grandes (3000 mm de comprimento), sendo portanto um deslocamento que se pode considerar admissível.

4. Acionamentos e comando do sistema

Este capítulo apresenta uma solução de comando do sistema recorrendo a diversos elementos de forma tornar o sistema o mais eficaz possível, sem necessidade de esforço humano e sem despende demasiado tempo.

Uma vez que o sistema apresentado neste trabalho é constituído em maioria por acionamentos hidráulicos e apenas por um mecanismo eletromecânico, este capítulo inicia-se pela apresentação de todos os circuitos hidráulicos necessários ao sistema.

Posteriormente, é descrito detalhadamente o dimensionamento e apresentada a escolha dos vários elementos de acionamento e comando de cada mecanismo.

Sendo a segurança um tema importante em qualquer máquina, foram apontadas algumas situações perigosas possíveis de ocorrer no sistema e apresentadas medidas preventivas para diminuir a probabilidade de ocorrerem, bem como evitar os danos decorrentes.

Por fim, uma vez que neste trabalho não é desenvolvida a parte de programação, construíram-se os GRAFCET's dos modos de funcionamento do sistema e fez-se a seleção do autómato programável adequado à aplicação.

4.1 Circuitos hidráulicos

4.1.1 Elevador

O elevador hidráulico, do tipo telescópico, constituído por dois cilindros hidráulicos de simples efeito que fazem o seu movimento, tal como já foi referido no capítulo 3.4.1 *Elevador hidráulico: estrutura e componentes*. O comando do movimento dos atuadores é realizado em fonte de caudal para o avanço. O circuito hidráulico respetivo encontra-se na Figura 90.

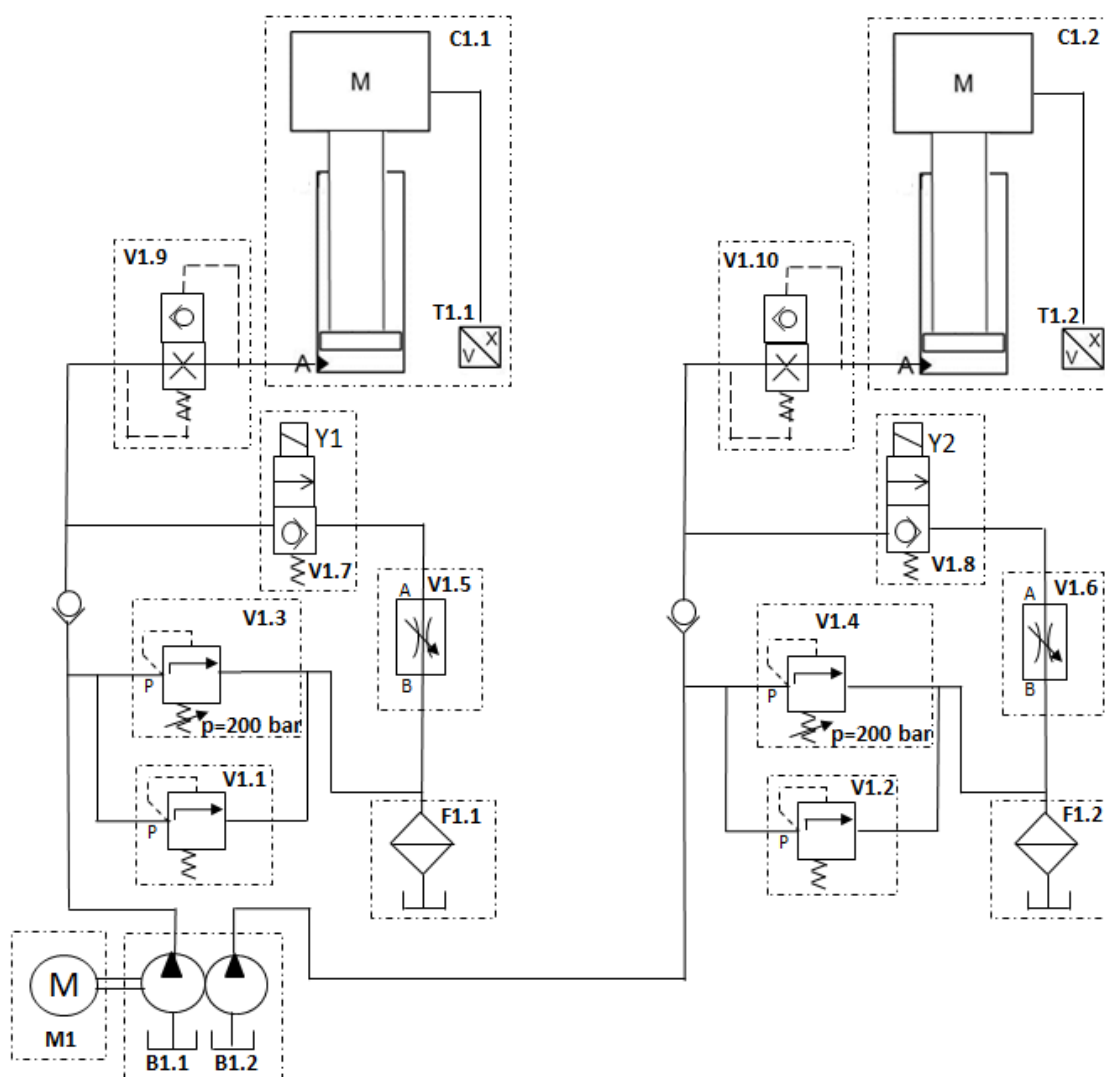


Figura 90. Circuito hidráulico do elevador.

Os elementos presentes no circuito hidráulico são:

- grupo hidráulico: agregado de 2 bombas de cilindrada fixa (de cilindrada igual) – (B1.1 e B1.2);
- 2 atuadores lineares de simples efeito: Ø200 – 3 000 (C1.1 e C1.2);
- 2 electroválvulas direcionais 2/2 normalmente fechadas (V1.7 e V1.8):
 - Y₁ e Y₂ – movimento de recuo;

- 2 válvulas limitadoras de pressão (V1.3 e V1.4);
- 2 válvulas de segurança (V1.1 e V1.2);
- 2 válvulas anti queda (limitadoras de caudal) (V1.9 e V1.10);
- 2 válvulas reguladoras de caudal (V1.5 e V1.6);
- 2 transdutores de posição (T1.1 e T1.2).

O movimento de recuo da haste dá-se à custa da carga gravítica, o controlo de velocidade deste movimento é assegurado pelas válvulas reguladoras de caudal (V1.5 e V1.6) colocadas em comando secundário (*meter-out*).

A sincronização do movimento de avanço e recuo dos dois cilindros é identificada através dos dois transdutores de posição (T1.1 e T1.2) que permitem uma medição rigorosa do deslocamento da haste.

4.1.2 Movimento de encaixe no guiamento

O movimento de encaixe no guiamento superior é conseguido através de dois cilindros de duplo efeito, como foi referido no capítulo 3.4.2 *Extremidades do rotor*. Estes atuadores realizam para além deste movimento vertical um movimento horizontal, movimento esse que permite o encaixe ou a libertação da mesa do elevador do veio principal do rotor. A existência da deslocação horizontal dos atuadores levou à escolha de cilindros de duplo efeito. O comando deste movimento é realizado em fonte de caudal para o avanço e o seu respetivo circuito hidráulico encontra-se na Figura 91.

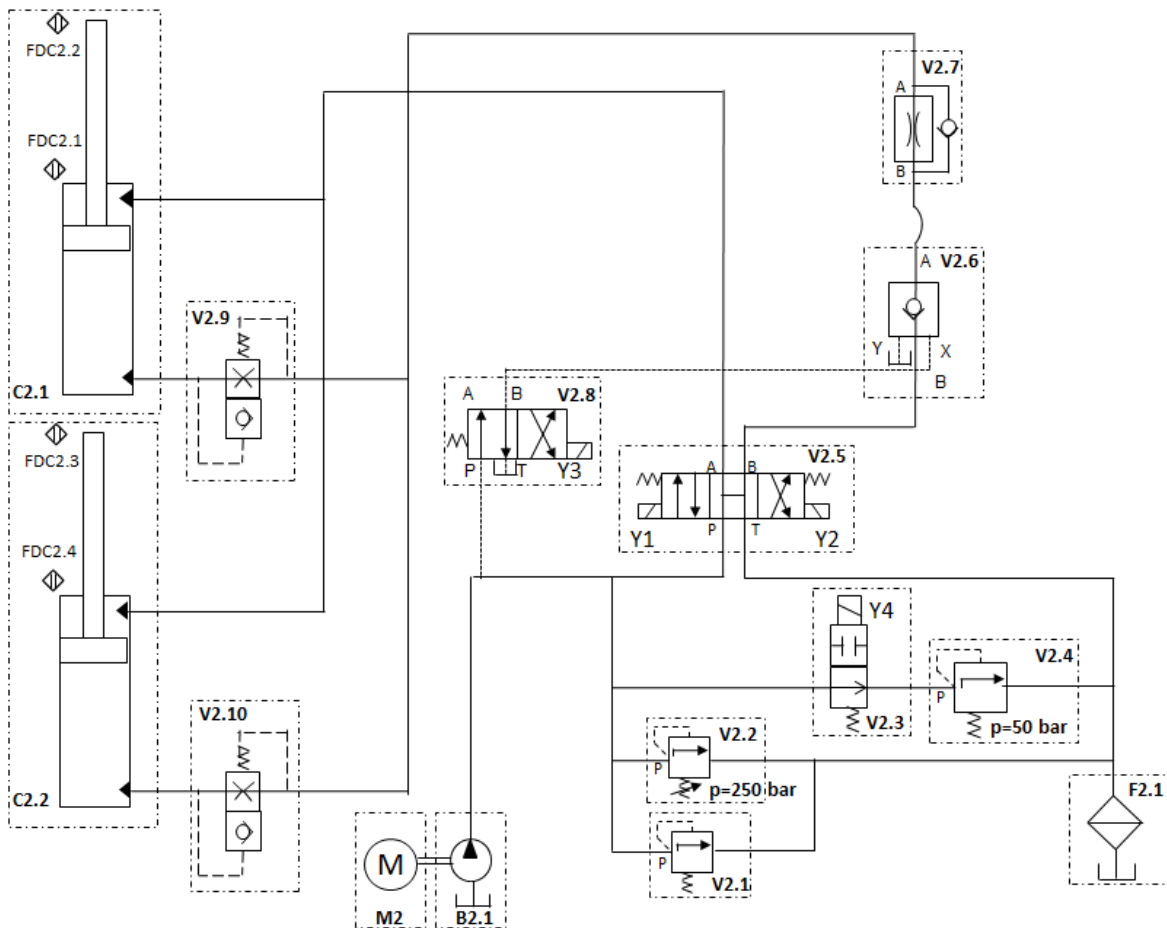


Figura 91. Circuito hidráulico do movimento de encaixe no guiamento.

Os elementos hidráulicos presentes no circuito hidráulico são:

- grupo hidráulico: bomba de cilindrada fixa (B2.1);
- 2 atuadores lineares de duplo efeito: $\varnothing 125 \times \varnothing 100 - 200$ (C2.1 e C2.2);
- electroválvula direcional 4/3 com centro aberto (V2.5):
 - Y_1 – movimento de recuo;
 - Y_2 – movimento de avanço;
- electroválvula direcional 4/2 normalmente fechada (V2.8):
 - Y_3 – atuação da válvula de retenção;
- válvula limitadora de pressão (V2.2);
- válvula de segurança (V2.1);
- 2 válvulas anti-queda (limitadoras de caudal) (V2.9 e V2.10);
- válvula reguladora de caudal de 2 orifícios (2.7);
- válvula de retenção pilotada (V2.6);
- válvula de descarga (V2.3):
 - Y_4 : bomba em carga
- válvula limitadora de pressão (V2.4)
- 4 detetores de fim de curso:
 - FDC2.1 – posição recuada do cilindro C2.1;

- FDC2.2 – posição avançada do cilindro C2.1;
- FDC2.3 - posição recuada do cilindro C2.2;
- FDC2.4 – posição avançada do cilindro C2.2;

Este é um circuito hidráulico que vai funcionar quer com carga (movimento vertical) quer sem carga (movimento horizontal). Em resultado disso foram definidas duas pressões para o circuito, uma superior, de 250 bar, para o movimento que exige mais esforço (movimento de avanço com carga) e outra inferior, de 50 bar, para os restantes movimentos. A comutação entre as duas pressões dá-se através da válvula direcional (V2.3) e a sua atuação coloca o circuito hidráulico a funcionar a 250 bar.

No movimento de recuo com carga a velocidade é controlada por ajuste da válvula reguladora de caudal de 2 orifícios (V2.7) colocada em comando secundário (*meter-out*).

Quando o cilindro se encontrar na vertical, parado e na sua posição mais elevada, vão existir fugas, uma vez que se está perante uma válvula de gaveta (V2.5), o que resulta numa descida lenta do êmbolo. Para impedir essa descida, colocou-se uma válvula de retenção pilotada (V2.6), em que a sua pilotagem é realizada de forma independente (V2.8) assegurando assim que se mantém aberta em todas as fases do movimento do cilindro.

O movimento do atuador C2.1 e C2.2 está limitado ao espaço compreendido entre os detetores FDC2.1 e FDC2.2 e FDC2.3 e FDC2.4, respetivamente.

4.1.3 Movimento de auxílio à articulação

O movimento de articulação da mesa do elevador é auxiliado por dois cilindros hidráulicos de duplo efeito, tal como foi referido no capítulo 3.4.2 *Extremidades do rotor*. Quando os cabos movidos pelo guincho se encontram a movimentar o rotor, no extremo “livre”, este movimento é auxiliado no outro extremo através da articulação da mesa. O circuito hidráulico respetivo encontra-se na Figura 92.

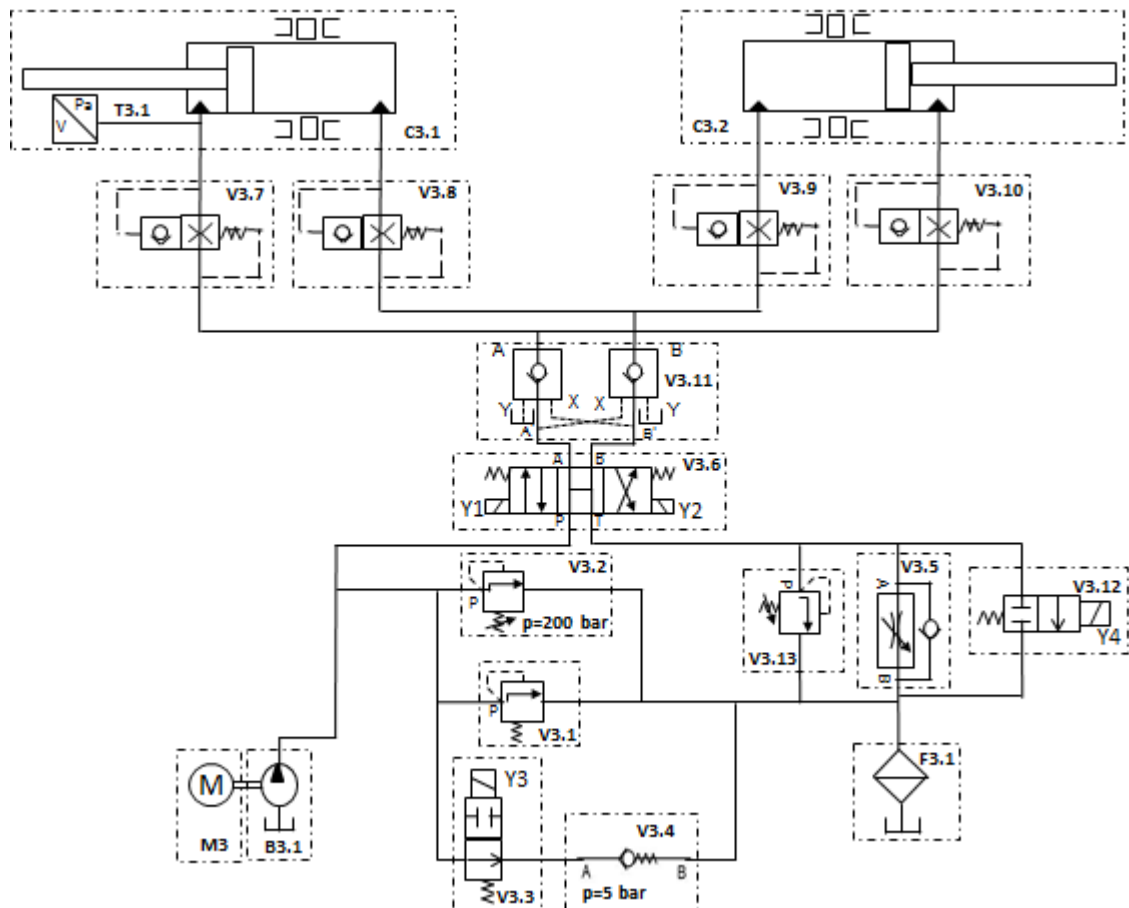


Figura 92. Circuito hidráulico dos cilindros de auxílio ao movimento de rotação

Os elementos hidráulicos presentes no circuito hidráulico são:

- grupo hidráulico: bomba de cilindrada fixa (B3.1);
- 2 atuadores lineares de duplo efeito: $\varnothing 125 \times \varnothing 70 - 900$ (C3.1 e C3.2);
- electroválvula direcional 4/3 de centro aberto (V3.6):
 - Y_1 – movimento de recuo;
 - Y_2 – movimento de avanço;
- 1 válvula limitadora de pressão; (V3.2)
- 1 válvula de segurança(V3.1);
- 4 válvulas anti-queda (V3.7, V3.8, V3.9 e V3.10);
- válvula de retenção simples (V3.4);
- válvula reguladora de caudal unidirecional de 2 orifícios ajustável (V3.5);
- válvula de descarga (V3.3):
 - Y_3 – bomba em carga;
- Válvula de descarga (V3.12)
 - Y_4 – em descarga direta para o tanque;
- Válvula de retenção dupla com fuga (V3.11)
- Válvula limitadora de pressão (V3.13)
- 1 transdutor de pressão (T3.1);

O movimento de recuo da haste corresponde à movimentação do rotor para a vertical, onde existem dois momentos distintos:

- 10°-80°: movimento comandado pelo sistema de cabos. Os atuadores apenas ajudam a elevar, encontrando-se portanto sempre à pressão máxima sem haver regulação de caudal pela válvula fluxométrica;
- 80°-90°: movimento passa a ser comandado pelos cilindros hidráulicos uma vez que os cabos perdem tensão e não conseguem realizar o movimento (estes 80° são apenas uma referência, o ângulo exato trata-se do momento preciso em que os cabos começam a perder força, passando os cilindros a comandar o movimento).

A existência de um transdutor de pressão (T3.1) permite identificar o momento em que a pressão começa a diminuir, significando que os cabos começaram a perder força. Nesse momento os cilindros têm o comando total do movimento em que a velocidade é comandada pela válvula reguladora de caudal de 2 orifícios (V3.5) colocada em comando secundário (*meter out*).

O movimento de avanço da haste é executado na movimentação de descida do rotor para a horizontal existindo igualmente dois momentos distintos:

- 90°- 80°: movimento comandado pelos cilindros hidráulicos, uma vez que o rotor ainda não se encontra numa posição em que os cabos estejam tensionados;
- 80°- 0°: movimento comandado pelo sistema de cabos, no entanto os cilindros vão estar a auxiliar a travagem do movimento.

O auxílio na travagem é conseguido através da abertura da válvula de descarga (V3.3) seguida de uma válvula de retenção simples (V3.4) regulada para 5 bar, que origina pressões baixas na câmara principal, o que resulta num movimento unicamente comandável pelo ajuste da válvula reguladora de caudal (V3.5). A válvula limitadora de pressão (V3.13) permite que a pressão não exceda valores não aconselháveis para a linha “T”.

4.2 Acionamentos

Para cada um dos circuitos hidráulicos foi necessário escolher uma bomba hidráulica que cumpra os requisitos necessários bem como o motor elétrico adequado para o seu acionamento. Para tal foi essencial calcular as velocidades presentes em cada mecanismo.

O cálculo da velocidade necessária no guincho foi realizado para cada um dos movimentos da movimentação do rotor para o exterior da máquina fragmentadora, adotando um valor constante para a velocidade do elevador.

Para o cálculo da expressão geral da velocidade no guincho recorreu-se à equação de Mozzi da cinemática, e as expressões obtidas encontram-se abaixo enunciadas. A Figura 93 permite identificar as várias relações entre os vários componentes.

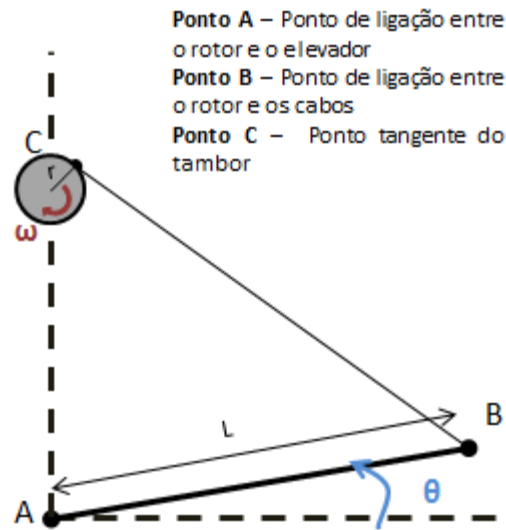


Figura 93. Esquema representativo das relações presentes entre sistemas.

Pela equação de Mozzi tem-se:

$$\vec{v}_{B_{20}} = \vec{v}_{A_{20}} + \vec{w}_{20} \times \vec{AB} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -v_A \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} L \cos(\theta) \\ L \sin(\theta) \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -L\dot{\theta} \sin(\theta) \\ -v_A + L\dot{\theta} \cos(\theta) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{com } \theta(t) = \int_0^t \dot{\theta} dt + \theta_0$$

$$\text{Velocidade angular do guincho: } \dot{\gamma}_{tambor} = \frac{\|v_C\|}{r} = \frac{\|v_B\|}{r}, \quad (5)$$

A velocidade necessária em cada movimento quer do elevador quer do guincho encontra-se apresentada na Tabela 12.

Tabela 12. Velocidades do tambor e elevador em cada movimento.

	<i>Velocidade rotação</i>	<i>Velocidade do elevador</i>	<i>Velocidade do guincho</i> $v = 4\text{ mm/s}$	
Movimento 1⁹ $0 \leq x \leq 150\text{ mm}$ $\theta = 0^\circ$	$\dot{\theta} = 0\text{ rad/s}$	$v = 4\text{ mm/s}$	$w_{\text{tambor}} = 0,0228\text{ rad/s}$ $n_{\text{tambor}} = 0,2180\text{ rpm}$	
Movimento 2¹⁰ $x = 0\text{ mm}$ $0 \leq \theta \leq 10^\circ$	$\dot{\theta} = 0,0017\text{ rad/s}$	$v = 0\text{ mm/s}$	$v = 10,411\text{ mm/s}$ $w = 0,0594\text{ rad/s}$ $n_{\text{tambor}} = 0,5673\text{ rpm}$	
Movimento 3⁹ $0 \leq x \leq 2500\text{ mm}$ $10 \leq \theta \leq 80^\circ$	$\dot{\theta} = 0,00195\text{ rad/s}$	$v = -4\text{ mm/s}$	$v_{\min} = 7,75\text{ mm/s}$ $\omega_{\min} = 0,04423\text{ rad/s}$ $n_{\min} = 0,422\text{ rpm}$	$v_{\max} = 11,65\text{ mm/s}$ $\omega_{\max} = 0,0665\text{ rad/s}$ $n_{\max} = 0,635\text{ rpm}$
Movimento 4⁹ $x = 0\text{ mm}$ $80 \leq \theta \leq 90^\circ$	$\dot{\theta} = 0,0017\text{ rad/s}$	$v = 0\text{ mm/s}$	$v = 10,411\text{ mm/s}$ $w = 0,0594\text{ rad/s}$ $n_{\text{tambor}} = 0,5673\text{ rpm}$	
Movimento 5⁹	$\dot{\theta} = 0\text{ rad/s}$	$v = 4\text{ mm/s}$ $v = -4\text{ mm/s}$	$v = 4\text{ mm/s}$ $w = 0,0228\text{ rad/s}$ $n_{\text{tambor}} = 0,218\text{ rpm}$	
Movimento 6⁹ $x = 0\text{ mm}$ $80 \leq \theta \leq 90^\circ$	$\dot{\theta} = 0,0017\text{ rad/s}$	$v = 0\text{ mm/s}$	$v = 10,411\text{ mm/s}$ $w = 0,0594\text{ rad/s}$ $n_{\text{tambor}} = 0,5673\text{ rpm}$	
Movimento 7⁹ $0 \leq x \leq 2500\text{ mm}$ $0 \leq \theta \leq 80^\circ$	$\dot{\theta} = -0,00223\text{ rad/s}$	$v = -4\text{ mm/s}$	$v_{\min} = -9,41\text{ mm/s}$ $\omega_{\min} = -0,0537\text{ rad/s}$ $n_{\min} = 0,513\text{ rpm}$	$v_{\max} = -13,23\text{ mm/s}$ $\omega_{\max} = -0,079\text{ rad/s}$ $n_{\max} = 0,756\text{ rpm}$
Movimento 8⁹ $x = 150\text{ mm}$ $\theta = 0^\circ$	$\dot{\theta} = 0\text{ rad/s}$	$v = -4\text{ mm/s}$	$v = -4\text{ mm/s}$ $w_{\text{tambor}} = -0,0228\text{ rad/s}$ $n_{\text{tambor}} = 0,2180\text{ rpm}$	

⁹ Os números dos movimentos são os referidos no capítulo 3.2.1 *Movimentação do rotor*.

Os passos para o dimensionamento quer das bombas quer dos motores elétricos encontram-se nas tabelas seguintes. Os motores elétricos escolhidos foram do fabricante *Siemens*.

Tabela 13. Parâmetros de seleção do motor e bomba para o elevador.

Bomba Hidráulica		Fórmulas utilizadas
Dados de entrada	v máx. cilindro= 2 mm/s	$Q_{neces.} = v_{máxcilindro} \times A_{\hat{e}mbolo}$ $Q = 3,762 \text{ l/min}$ $p_{avanço} = \frac{F}{A_{\hat{e}mbolo}} = 130 \text{ bar}$
	Ø êmbolo =200 mm	
	n =1500 rpm	
	F=410 kN	
Parâmetros de seleção		$Cg_{necessária} = \frac{Q_{neces}}{n} \times 1000$
Motor Elétrico		Fórmulas utilizadas
Dados de entrada	Q = 3,762 l/min	$P_{acc \text{ bomba}} = Q \times p_{avanço}$
	número bombas = 2	
Parâmetros de seleção		$P_{neces.} = P_{acc \text{ bomba}} \times n_{bombas}$
Caraterísticas selecionadas	Motor 1LA7106-4AA92	
	P=2,20 kW	
	n = 1500 rpm	

Tabela 14. Parâmetros de seleção da bomba e motor para o movimento de encaixe no guiamento.

Bomba Hidráulica		Fórmulas utilizadas
Dados de entrada	v máx. cilindro= 4 mm/s	$Q_{neces.} = n_{cilindros} \times (v_{máxcilindro} \times A_{\hat{e}mbolo})$ $Q = 5,879 \text{ l/min}$ $p_{avanço} = \frac{F}{A_{\hat{e}mbolo}} = 150 \text{ bar}$
	Ø êmbolo =125 mm	
	n =1500 rpm	
	F=185 kN	
	n cilindros = 2	
Parâmetros de seleção		$Cg_{necessária} = \frac{Q_{neces}}{n} \times 1000$

Motor Eléctrico		Fórmulas utilizadas
Dados de entrada	$Q = 5,879 \text{ l/min}$ número bombas = 1	$P_{acc \text{ bomba}} = Q_{teórico} \times p_{avanço}$
Parâmetros de seleção	$P_{neces.} = 2,329 \text{ kW}$ $P_{nominal} = 3,0 \text{ kW}$	$P_{neces.} = P_{acc \text{ bomba}} \times n_{bombas}$
Caraterísticas seleccionadas	Motor 1LA7107-4AA92 $P = 3,0 \text{ kW}$ $n = 1500 \text{ rpm}$	

Tabela 15. Parâmetros de seleção da bomba e motor para o movimento de auxílio à articulação.

Bomba Hidráulica		Fórmulas utilizadas
Dados de entrada	$v_{\text{máx. cilindro}} = 3,98 \text{ mm/s}$ $\varnothing \text{ êmbolo} = 125 \text{ mm}$ $\varnothing \text{ haste} = 70 \text{ mm}$ $n = 1500 \text{ rpm}$ $F = 150 \text{ kN}$ $n_{\text{cilindros}} = 2$	$Q_{neces.} = n_{\text{cilindros}} \times (v_{\text{máxcilindro}} \times A_{\text{êmbolo}})$ $Q = 5,85 \text{ l/min}$ $p_{avanço} = \frac{F}{A_{\text{embôlo}} - A_{\text{haste}}} = 170 \text{ bar}$
Parâmetros de seleção	$C_g = 3,9 \text{ cm}^3/\text{rot}$ $Q = 5,85 \text{ l/min @250 bar}$	$C_{g_{necessária}} = \frac{Q_{neces}}{n} \times 1000$
Motor Eléctrico		Fórmulas utilizadas
Dados de entrada	$Q = 5,85 \text{ l/min}$ número bombas = 1	$P_{acc \text{ bomba}} = Q_{teórico} \times p_{avanço}$
Parâmetros de seleção	$P_{neces.} = 1,73 \text{ kW}$ $P_{nominal} = 2,2 \text{ kW}$	$P_{neces.} = P_{acc \text{ bomba}} \times n_{bombas}$
Características seleccionadas	Motor 1LA7106-4AA92 $P = 2,2 \text{ kW}$ $n = 1500 \text{ rpm}$	

No guincho existe variação de velocidade ao longo do movimento de rotação. Por esta razão o motor escolhido foi um servomotor com redutor e freio mecânico da SEW.

O guincho é auxiliado no movimento de articulação do rotor, como já foi referido no capítulo 3.4.2 *Extremidades do rotor*, pelos cilindros hidráulicos presentes na mesa do elevador mas também pelo contrapeso existente na mesma mesa. O esforço realizado pelo guincho vem então reduzido. Para o seu cálculo teve-se em conta as forças representadas no esquema da Figura 94, obtendo-se um valor aproximado de 160 kN.

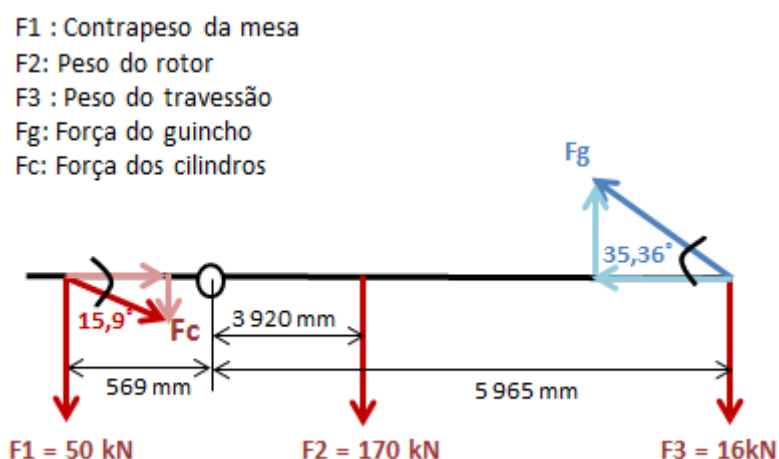


Figura 94. Esquema representativo das forças presentes quando o rotor se encontra na horizontal.

A seleção do servomotor foi feita através do *software* de ajuda que a SEW disponibiliza, onde é possível selecionar de acordo com a aplicação, neste caso o guincho. O conjunto servomotor e redutor escolhido apresenta-se na Tabela 16 e é composto por redutor com dois andares.

Tabela 16. Parâmetros de seleção do servomotor para o sistema tambor.

Servomotor com redutor		
Dados de entrada	$V_{\text{máx guincho}} = 14 \text{ mm/s}$ $V_{\text{min guincho}} = 4 \text{ mm/s}$ $F_{\text{elevação}} = 160 \text{ kN}$ $\varnothing_{\text{tambor}} = 350,5 \text{ mm}$	
Parâmetros de seleção (obtidos pela SEW)	$M_{\text{máx,start}} = 26,471 \text{ kNm}$ $M_{\text{amáx}} = 24,024 \text{ kNm}$	$M_{\text{máx start}}$: binário máximo inicial necessário; $M_{\text{amáx}}$: binário máximo necessário em ciclo contínuo;
Caraterísticas selecionadas	Servomotor com redutor K167 R97 DRE132MC4 $i = 843$ Potência entrada = 7,5 kW $n_{\text{saída}} = 1,7 \text{ rpm}$ $M_{\text{saída}} = 37,645 \text{ kNm}$	i : razão de transmissão do redutor;

4.3 Elementos de Comando e Sensorização

4.3.1 Elemento de comando e controlo do servomotor

Para o controlo e comando do servomotor será utilizado um *servodrive*, a sua seleção foi inerente à escolha do servomotor, recaindo no MOVIDRIVE B MDX61B. As suas características de relevo para esta aplicação são:

- Opção de resistência de frenagem;
- Equipado de origem com controlo de posição e sequência de movimentos através do sistema integrado IPOS^{Plus®};
- Slot para carta de comunicação opcional para integração em sistemas Ethernet, PROFIBUS, INTERBUS, CANopen;
- Interface RS485 para comunicação entre PLC/IPC, e ainda a opção de converter sinais RS232 em RS485;
- Opção de adicionar um cartão de entradas/saídas DIO11B que expande as entradas, digitais e analógicas, e saídas da unidade base MOVIDRIVE.

4.3.2 Detetores de fim de curso

No movimento linear dos dois cilindros hidráulicos ,que realizam o encaixe da peça superior do rotor no guiamento bem como o movimento de colocar e retirar a peça inferior do rotor, foi necessário a introdução de dois detetores de fim de curso magnéticos (dois para cada cilindro). Estes detetores vão identificar a presença da haste do cilindro nos seus extremos de posição, totalmente avançada ou totalmente recuada, identificando assim o momento de paragem.

4.3.3 Transdutor de pressão

Os dois cilindros que auxiliam o movimento de rotação do rotor para a vertical, tal como já foi referido no capítulo 4.1.3 *Movimento de auxílio à articulação*, vão conter no seu circuito hidráulico um transdutor de pressão na linha de alimentação da câmara secundária.

Estes transdutores têm como função identificar o momento em que os cabos, devido à posição angular do rotor, deixam de estar tensionados e passarão então os cilindros a ter o comando do movimento.

A escolha por um transdutor de pressão, excluindo outros tipos, deve-se ao facto de ser praticamente impossível identificar o momento, quer a nível de deslocamento quer a nível de tempo, em que os cabos começam a deixar de fazer força. Assim, a melhor forma é através da pressão presente nos cilindros hidráulicos, quando esta começar a diminuir significa que os cabos começaram a perder força.

4.3.4 Transdutores de deslocamento

No movimento do elevador foi necessário colocar dois transdutores de deslocamento, um em cada cilindro hidráulico. A função destes transdutores é medir o movimento de cada atuador de modo a se poder fazer um controlo rigoroso do deslocamento, conseguindo assim colocar o elevador na posição pretendida, mas também obter-se uma monitorização do elevador, obtendo em cada momento a posição efetiva deste.

A escolha do tipo de transdutor de deslocamento recaiu num transdutor de cabo devido, sobretudo devidos a uma questão económica, com um alcance de 3 000 mm.

4.3.5 Codificador

No movimento em que existe um movimento de rotação de cerca de 10° realizado apenas pelo sistema de cabos, foi necessário incluir um codificador na peça inferior do rotor.

Este codificador vai permitir saber o momento em que o rotor se encontra a 10° da posição horizontal, e assim enviar o comando de paragem ao servomotor e aos cilindros hidráulicos. Além disso, vai possibilitar ter conhecimento a todo o momento da posição de rotação a que se encontra o rotor permitindo assim ter uma monitorização completa de todo o processo.

Tabela 17. Resumo dos elementos de sensorização utilizados.

Tipo de sensorização	<i>Detetor de fim de curso</i>	<i>Transdutor de pressão</i>	<i>Transdutor de deslocamento</i>	<i>Codificador</i>
Local	Cilindros hidráulicos C2.1 e C2.2	Cilindros hidráulicos C3.1 e C3.2	Cilindros hidráulicos C1.1 e C1.2	Peça inferior do rotor
Quantidade	4	1	2	1
Gama	-	300 bar	3 000 mm	90 graus
Sinal	Digital	Analógico	Analógico	Analógico

4.4 Segurança

A segurança é um dos elementos imprescindíveis de abordar numa máquina. A solução desenvolvida, por si só, é uma alternativa mais segura ao procedimento atual, uma vez que um dos objetivos é eliminar os vários problemas de segurança que o processo de manutenção atual incorpora.

Contudo, existem algumas situações perigosas para os operadores durante o funcionamento do sistema. Aquando da movimentação do rotor para o exterior da máquina fragmentadora, existe a possibilidade de resíduos metálicos, que ficaram presos em certas partes do rotor, caírem por cima da plataforma que serve de espaço de trabalho aos operadores. De forma a eliminar o risco de tais situações perigosas torna-se essencial a construção de um gradeamento em volta da plataforma inferior limitando o acesso a toda a máquina durante o seu funcionamento. (Figura 95) A inexistência de gradeamento na plataforma superior deve-se ao facto do seu acesso é apenas permitido através da plataforma inferior, assim sendo, estando limitado o acesso à plataforma inferior naturalmente está limitado o acesso à superior. A plataforma superior poderá ter um gradeamento de pouca altitude para evitar descuidos e desequilíbrios por parte dos operadores para a plataforma inferior.

Para aumentar ainda mais a segurança, a porta do gradeamento deverá garantir a imobilização do sistema aquando da sua abertura, e não deverá permitir a iniciação de movimentos enquanto esta se mantiver aberta e com operadores na plataforma.

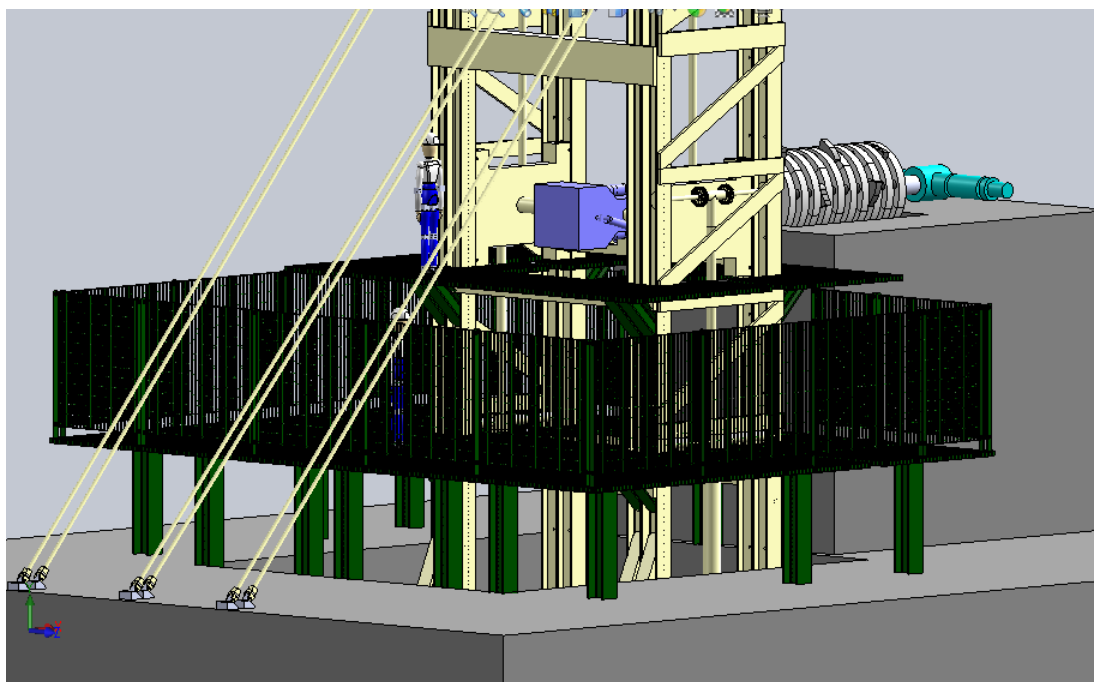


Figura 95. Gradeamento na plataforma.

4.5 GRAFCET

O GRAFCET foi a metodologia usada para descrever o processo sequencial dos vários movimentos do sistema. O GRAFCET geral bem como os que correspondem a cada movimento encontram-se em anexo, ANEXO E: GRAFCET'S de programação. O GRAFCET do sistema foi estruturado de forma a que a todo o momento todas as variáveis estejam a ser verificadas. Em qualquer momento o movimento pode ser interrompido, abortado ou ativado o estado de emergência.

Este sistema tem apenas um modo de funcionamento, o modo manual, funcionando por comando sensitivo, ou seja, é obrigatório premir um botão monoestável (mover), que quando premido continuamente aciona os elementos responsáveis pelo movimento selecionado. A interrupção do movimento dá-se quando o botão é largado.

Na Figura 96 encontra-se representado um protótipo de consola de comando de funcionamento do sistema, para melhor se compreender o funcionamento do mesmo.



Figura 96. Comando de funcionamento.

Para iniciar o movimento do rotor é necessário escolher primeiro, através do seletor, a sequência que se pretende:

- de “**avanço**”, sequência de movimentos que colocam o rotor na vertical dentro do elevador, ou
- de “**recuo**”, sequência de movimentos que colocam o rotor na horizontal dentro da máquina fragmentadora.

De seguida é necessário validar a sequência escolhida através da botoneira “confirmar” e o movimento apenas se inicia quando é premida a botoneira “mover”. Se, em algum momento, o operador desejar inverter o sentido do movimento terá que premir a botoneira “abortar”, levando o sistema à condição de imóvel. Só de seguida é que é possível selecionar a sequência oposta e repetir todos os passos já referidos para assim iniciar o movimento novamente.

Para o movimento de posicionamento do rotor ao nível de trabalho do operador, movimento 5¹⁰, é necessário ativar a botoneira “modo de posicionamento”, selecionar o movimento que pretende, “subida” ou “descida”, através do seletor para esse fim e de seguida validar através da botoneira “confirmar”. O movimento só se inicia quando é premida a botoneira “mover”.

Com este procedimento pretende-se limitar as potenciais falhas de operação que um utilizador possa ter deste sistema, dada a sua perigosidade de funcionamento.

A emergência compreende todas as variáveis relacionadas com situações de emergência e segurança, como a botoneira de emergência, a abertura da porta do gradeamento, falha de alimentação, etc.

¹⁰ Os números dos movimentos são os referidos no capítulo 3.2.1 *Movimentação do rotor*

4.6 Autómatos programáveis

A escolha do autómato programável foi feita com base nos requisitos do sistema, nomeadamente no número de variáveis presentes e na exigência do tempo de resposta. A Tabela 18 exibe o número de variáveis digitais e analógicas que o sistema apresenta, de onde se conclui-se que o sistema não requer grandes exigências no seu controlo, uma vez que o seu funcionamento é manual (atuação de botoneiras), e não obriga a tempos de resposta reduzidos. Assim sendo, o autómato necessário será de gama baixa/intermédia.

Tabela 18. Variáveis do sistema

Variáveis do sistema	
Entradas Digitais	24
Saídas Digitais	8
Entradas Analógicas	5

A escolha do PLC recaiu no autómato programável *Twido* da *Schneider*, tratando-se de um autómato modular constituído pelos módulos descritos na Tabela 19, que foram escolhidos com base no número de entradas e saídas necessárias.

Tabela 19. Módulos selecionados para o autómato.

Módulos do Twido				
Referência	TWDLMA40TDK	ABE7H20E100	TM2DRA16RT	TM2AMI8HT
Designação	Base modular	Base de ligações passivas para entradas digitais	Módulo de saídas digitais	Módulo de entradas analógicas
Caraterísticas	40 Entradas/saídas	16 Entradas	16 Saídas a relé	8 Entradas
Quantidade	1	2	1	1

5. Conclusões

O desenvolvimento desta dissertação permitiu reconhecer que o processo de manutenção mais eficiente para uma máquina fragmentadora de rotor horizontal, mais concretamente de configuração fechada com martelos, é a movimentação do rotor para o exterior da máquina, e proceder à sua manutenção na posição vertical. Além disso foi possível concluir que é possível a coexistência de toda a estrutura necessária para esta nova solução com o normal funcionamento da máquina fragmentadora.

Conclui-se que com esta nova solução consegue-se reduzir significativamente o tempo despendido com a manutenção do rotor, problema principal que leva à quebra de produção e, por isso, a um sucesso económico não tão grande quanto se poderia alcançar. A solução apresentada, através da diminuição do tempo de manutenção de 3 dias para 1 dia, consegue reduzir de 15% para cerca de 5% da imobilização de produção mensal. Esta redução de tempo foi conseguida através da:

- Redução da complexidade e esforço do processo de manutenção;
- Possibilidade de escolha dos elementos a substituir;
- Ampliação do espaço de trabalho, que permite que mais que um operador possa realizar a manutenção do rotor;
- Simultaneidade das operações de manutenção no rotor e no interior da máquina fragmentadora.

Esta nova solução consegue ainda resolver os atuais problemas de insegurança, na operação de manutenção, com o transporte do espaço de trabalho para o exterior da máquina em duas plataformas.

A análise estrutural realizada à estrutura global e ao elemento que sofrerá maiores esforços permitiu concluir que nunca entrarão no regime plástico, ou seja, nunca irão sofrer uma deformação plástica, nem atingirão a tensão de rutura durante o normal funcionamento da máquina fragmentadora.

A solução de automação, apesar de não ter sido muito aprofundada, permitiu perceber que particamente todos os acionamentos seriam hidráulicos, uma vez que se está a trabalhar com forças consideráveis. Para o sistema de rotação, o guincho, o acionamento deverá ser elétrico, e como necessita de variação contínua de velocidade, a escolha recaiu num servomotor. Para além disso, todo o controlo do processo envolveu a utilização de detetores de fim de curso, transdutores e codificadores e o seu comando através de um PLC.

5.1 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, uma vez que esta dissertação trata apenas do estudo preliminar do projeto mecânico e do projeto de automação, propõe-se a finalização da parte mecânica. Já quanto ao projeto de automação, propõe-se a construção dos esquemas elétricos e a escolha das válvulas e transdutores a utilizar.

Após todo o detalhe quer do projeto mecânico quer do projeto de automação estar completo, propõe-se, obviamente, um estudo económico para a validação detalhada da eficácia de toda a solução e, sendo caso disso, a construção dos equipamentos, o ajustamento do projeto de automação em função das necessidades após a montagem e a programação do PLC e *servodrive*.

Análise financeira ao projeto, que deve incluir um cálculo dos tempos necessários para amortizar o investimento despendido com toda a solução.

Por fim, já não diretamente relacionado com esta dissertação, propõe-se a realização de um estudo aprofundado da nova configuração de rotor utilizada na solução desenvolvida. Este estudo tem como intuito perceber a sua eficácia, em termos de fragmentação de componentes metálicos, a sua durabilidade, o seu desgaste e outras características também importantes para a caracterização de um rotor.

6. Bibliografia

- Shredder Focus: A Guide to Rotors*. (22 de Agosto de 2002). Obtido em 15 de Abril de 2014, de Recycling Today.: http://www.recyclingtoday.com/Article.aspx?article_id=18415
- Alton S. Newell, A. S. (1985). *Patente N.º US4504019 A*.
- B2Bmetal*. (2014). Obtido em Abril de 2014, de HEB beams, European standard wide flange H beam: <http://www.b2bmetal.eu/heb-sections-specification>
- Cobermaster. (2014). *Produtos Siderurgicos e Acessórios*: Gradil.
- Deha, H. . (2014). *Sistema de tirantes Detan - Guia Técnico*.
- Equipment Report*. (20 de Dezembro de 2002). Obtido em 15 de Abril de 2014, de Recycling Today: http://www.recyclingtoday.com/Article.aspx?article_id=18561
- F. Ramada, A. e. (29 de 07 de 2012). *Catálogo Interactivo*. Obtido em 2 de 05 de 2014, de <http://www.ramada.pt/index.php?cat=45&eb=13>
- FERCELL. (2014). *Vertical Shredders*. Obtido em 21 de Março de 2014, de <http://www.bomaticuk.com/shredder/vertical-shredding/>
- Freitas, F. (1998). *Elementos de Hidráulica Proporcional*. Porto: Hidromática, soluções de automação.
- Freitas, F. (2012). *Apontamentos de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos*. Porto: FEUP.
- Granta Design Limited. (2012). CES Edupack.
- H. R. Manouchehri, N. O. (2007). *Looking at Shredding Plant Configuration and Its Performance for Developing Shredding Product Stream*. Jernkontorets Forskning.
- Hammel. (2014). *Secondary Shredder*.
- Hammer mills. (2014). *Shredders*. Obtido em 22 de Março de 2014, de <http://www.hammermillsintl.com/shredders.php>
- HENSCHEL, A. (s.d.). *Grinder Miller*. 2014.
- Instituto Nacional de Estatística. (2010). *Estatísticas do Comércio 2009*. Portugal.
- Instituto Nacional de Estatística. (2013). *Estatísticas do Comércio 2012*. Portugal.
- Kubota*. (2014). Obtido em 14 de Março de 2014, de High-speed vertical shredders: http://env.kubota.co.jp/recycle/english/vertical_shredder/index.html

Metso. (2014). Obtido em 15 de Março de 2014, de Shredders from Metso: http://www.metso.com/recycling/mm_recy.nsf/WebWID/WTB-041123-2256F-647B3?OpenDocument#.U6oB0pRdWsw

Oliveira e Sá. (2014). Special wire ropes. The advanced line.

Pinhol. (s.d.). Tubo Mecânico.

SCRAP&co. (12 de Março de 2014). Obtido em 8 de Maio de 2012, de DANIELI CENTRO RECYCLING newsletter: <http://www.akros-henschel.com/blogen/?paged=3>

Shredder Plant. (2014). Obtido em 18 de Fevereiro de 2014, de Morrita Group: <http://www.morita119.com/en/products/recycling/shredder/001.html>

Skylight Estruturas Metálicas. (s.d.). Obtido em 10 de Março de 2014, de Tabela de Perfis Laminados I e H: http://www.skylightestruturas.com.br/perfis_ih.asp

Tuper. (s.d.). Tubos mecânicos e estruturais.

UNTHA, s. t. (2014). Obtido em Março de 2014, de Shredding Solutions: <http://www.untha.com/en/solutions>

US shredder and casting group. (2014). US shredder's 7090 heavy duty shredder.

WENDT, W. (2012). Shredder Rotors.

ANEXO A: Listagem dos componentes hidráulicos

Atuadores	
Código	Designação
C1.1	Cilindro hidráulico de simples efeito Ø 200 - 3000
C1.2	Cilindro hidráulico de simples efeito Ø 200 - 3000
C2.1	Cilindro hidráulico de duplo efeito Ø 125 x Ø 100- 200
C2.2	Cilindro hidráulico de duplo efeito Ø 125 x Ø 100- 200
C3.1	Cilindro hidráulico de duplo efeito Ø 125 x Ø 100- 900
C3.2	Cilindro hidráulico de duplo efeito Ø 125 x Ø 100- 900

Válvulas	
Código	Designação
V1.1	Válvula de segurança
V1.2	Válvula de segurança
V1.3	Válvula limitadora de pressão regulada para 200 bar
V1.4	Válvula limitadora de pressão regulada para 200 bar
V1.5	Válvula estranguladora bidirecional
V1.6	Válvula estranguladora bidirecional
V1.7	Electroválvula direcional 2/2 normalmente fechada
V1.8	Electroválvula direcional 2/2 normalmente fechada
V1.9	Válvula anti queda
V1.10	Válvula anti queda
V2.1	Válvula de segurança
V2.2	Válvula limitadora de pressão regulada para 250 bar
V2.3	Válvula de descarga
V2.4	Válvula limitadora de pressão regulada para 50 bar
V2.5	Electroválvula direcional 4/3 de centro fechado
V2.6	Válvula de retenção pilotada
V2.7	Válvula reguladora de caudal de 2 orifícios
V2.8	Electroválvula direcional 4/2 normalmente fechada
V2.9	Válvula anti queda
V2.10	Válvula anti queda

Válvulas	
<i>Código</i>	<i>Designação</i>
V3.1	Válvula de segurança
V3.2	Válvula limitadora de pressão regulada para 200 bar
V3.3	Válvula de descarga
V3.4	Válvula de retenção simples regulada para 5 bar
V3.5	Válvula reguladora de caudal de 2 orifícios
V3.6	Electroválvula direcional 4/2 normalmente fechada
V3.7	Válvula anti queda
V3.8	Válvula anti queda
V3.9	Válvula anti queda
V3.10	Válvula anti queda
V3.11	Válvula de retenção dupla com fuga
V3.12	Válvula de descarga
V3.13	Válvula limitadora de pressão

ANEXO B: Motores elétricos

ANEXO C: Listagem de variáveis

Entradas digitais	
<i>Código</i>	<i>Designação</i>
	Monitorização do nível do óleo
	Monitorização do filtro
M1	Monitorização do Motor do circuito hidráulico 1
M2	Monitorização do Motor do circuito hidráulico 2
M3	Monitorização do Motor do circuito hidráulico 3
	Monitorização do Pressóstato do circuito hidráulico 1
	Monitorização do Pressóstato do circuito hidráulico 2
	Monitorização do Pressóstato do circuito hidráulico 3
FDC3.1	Detetor de Fim de curso de recuo do cilindro C3.1
FDC3.2	Detetor de Fim de curso de avanço do cilindro C3.1
FDC3.3	Detetor de Fim de curso de recuo do cilindro C3.2
FDC3.4	Detetor de Fim de curso de avanço do cilindro C3.2
S1	Seleção de sequência de avanço
S2	Seleção de sequência de recuo
S3	Seleção de sequência em “0”
S4	Seleção do movimento de subida
S5	Seleção do movimento de descida
S6	Seleção do movimento em “0”
BM	Botoneira “mover”
BA	Botoneira “abortar”
BP	Botoneira “Modo de Posicionamento”
BE	Botoneira de emergência
BC	Botoneira “confirmar”
SS	Sensor de Segurança

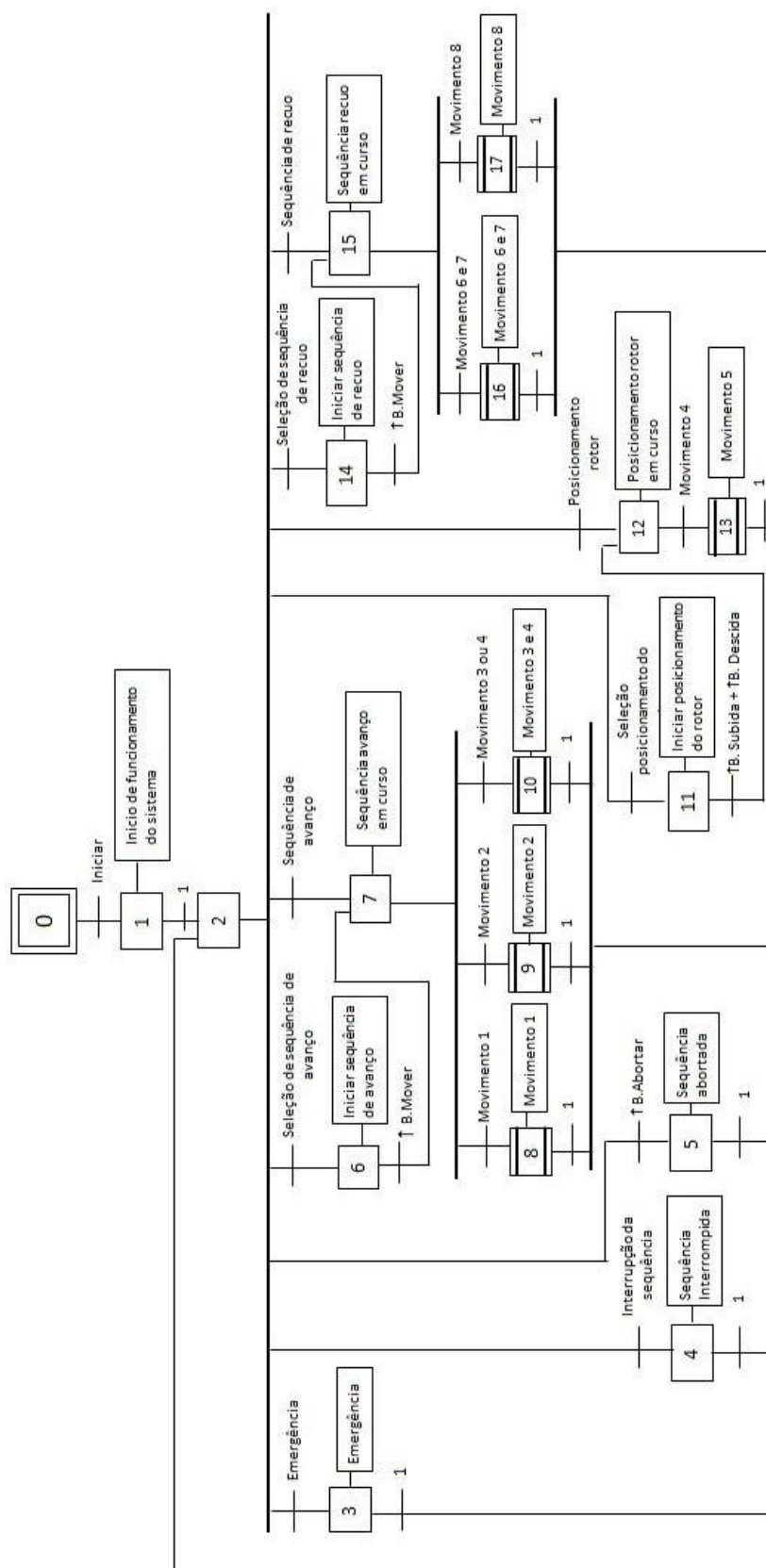
Saídas digitais	
<i>Código</i>	<i>Designação</i>
	Solenóide Y1 da electroválvula V1.7
	Solenóide Y1 da electroválvula V1.8
	Solenóide Y1 da electroválvula V2.4
	Solenóide Y2 da electroválvula V2.4
	Solenóide Y3 da electroválvula V2.5
	Solenóide Y1 da electroválvula V3.6
	Solenóide Y2 da electroválvula V3.6
	Solenóide Y3 da electroválvula V3.3

Entradas analógicas	
<i>Posição</i>	<i>Designação</i>
T1.1	Transdutor de deslocamento do cilindro C1.1
T1.2	Transdutor de deslocamento do cilindro C1.2
T3.1	Transdutor de pressão do cilindro C3.1
T3.2	Transdutor de pressão do cilindro C3.2
CFC	Codificador

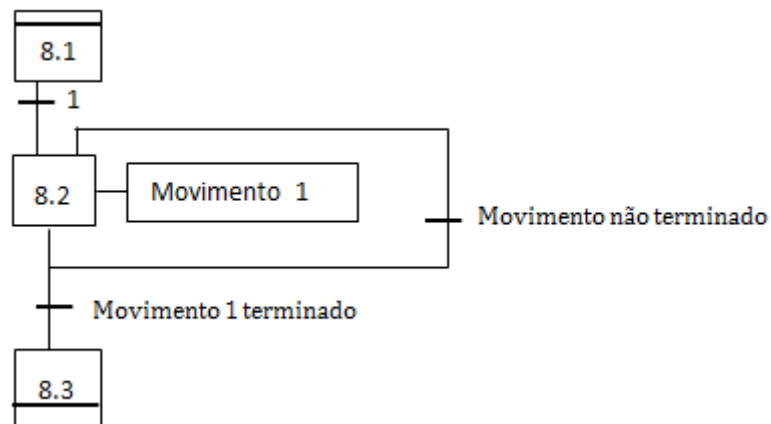
ANEXO D: Autómato Twido

ANEXO E: GRAFCET'S de programação

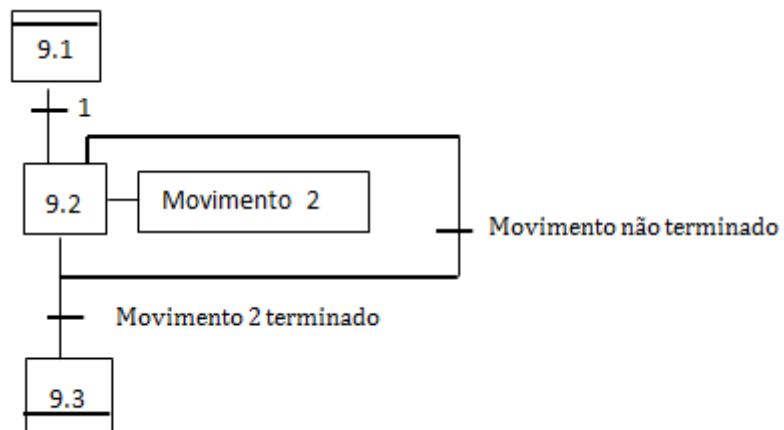
GRAFECT geral



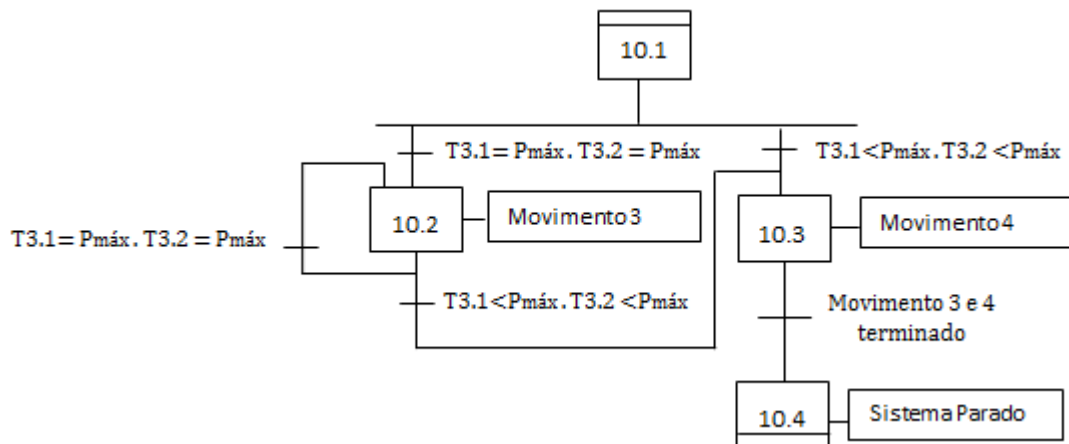
Movimento 1: movimento ascendente



Movimento 2: movimento angular



Movimento 3e 4: movimento linear descendente e movimento angular



Movimento 5: movimento linear descendente e ascendente

